



# Stanovení vlivu vneseného tepla na tvar teplotních cyklů při svařování metodou MAG

## Diplomová práce

*Studijní program:*

N2301 Strojní inženýrství

*Studijní obor:*

Strojírenská technologie a materiály

*Autor práce:*

**Bc. Jiří Vondráček**

*Vedoucí práce:*

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

*Konzultant práce:*

Ing. Bc. Martin Švec, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie





## Zadání diplomové práce

# Stanovení vlivu vneseného tepla na tvar teplotních cyklů při svařování metodou MAG

*Jméno a příjmení:* **Bc. Jiří Vondráček**  
*Osobní číslo:* S19000241  
*Studijní program:* N2301 Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* Strojírenská technologie a materiály  
*Zadávací katedra:* Katedra strojírenské technologie  
*Akademický rok:* **2020/2021**

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se teoreticky s principem vzniku teplotních cyklů při svařování a s jejich vlivem na změny v TOO.
2. Seznamte se teoreticky s možnostmi měření teplotních cyklů při svařování a s možnostmi použití různých druhů termočlánků (výhody, nevýhody, aplikace).
3. Seznamte se s problematikou změn, k nimž dochází v TOO jemnozrnných ocelí po aplikaci svařovacího cyklu.
4. Navrhněte experimentální program zaměřený na definování závislosti geometrie návaru na hodnotě vneseného tepla.
5. Provedte posouzení vlivu intenzity odvodu tepla (definované rozdílnou tloušťkou materiálu) na geometrii návaru.
6. Na základě provedených experimentů změřte teplotní cykly vznikajících v TOO při svařování. Měření proveďte pouze pro vybranou tloušťku materiálu a zvolené hodnoty vneseného tepla.
7. Posuďte vliv těchto cyklů na změny vlastností v TOO u vybrané jemnozrnné oceli.
8. Provedte vyhodnocení experimentů, diskutujte dosažené výsledky, sumarizujte výsledky a proveďte doporučení pro další výzkum.

*Rozsah grafických prací:*  
*Rozsah pracovní zprávy:*  
*Forma zpracování práce:*  
*Jazyk práce:*

tabulky, grafy  
cca 50  
tištěná/elektronická  
Čeština



### **Seznam odborné literatury:**

- [1] MORAVEC, J. Nové metodické postupy získávání vstupních dat pro numerické simulace svařování a tepelného zpracování u materiálů využívaných v energetickém průmyslu. Habilitační práce, TUL 2015.
- [2] MORAVEC, J. a J. BRADÁČ. Možnosti a využití teplotně-napěťového simulátoru Gleeble při výzkumu technologické zpracovatelnosti materiálů. Skripta – 1. vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-138-2.
- [3] KOUKAL, J., D. SCHWARZ a J. HAJDÍK. Materiály a jejich svařitelnost. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [4] MORAVEC, J. Vliv procesních parametrů na geometrii svarové lázně při svařování v ochranných atmosférách. Skripta – 1. vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2011. ISBN 978-80-7372-682-9.
- [5] HRSTKA, D.: Vliv směsi plynu na efektivitu provedení svaru a stabilitu procesu MAG. /Diplomová práce/, Liberec 2007, TU Liberec, FS.
- [6] Technické normy ČSN.

*Vedoucí práce:* doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

*Konzultant práce:* Ing. Bc. Martin Švec, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

*Datum zadání práce:* 15. listopadu 2020

*Předpokládaný termín odevzdání:* 15. května 2022

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 15. listopadu 2020

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

1. června 2021

Bc. Jiří Vondráček



# **Stanovení vlivu vneseného tepla na tvar teplotních cyklů při svařování metodou MAG**

## **Anotace**

Diplomová práce je zaměřena na stanovení vlivu hodnoty měrného vneseného tepla na geometrii svarové housenky a na rozložení teplot v TOO při navařování metodou MAG.

Teoretická část práce se zabývá fyzikálními veličinami potřebnými pro popis vzniku a šíření teplotních polí při svařování, popisuje princip svařování obloukovými metodami (se zaměřením na metodu MAG) a je věnována změnám, k nimž dochází v TOO, teplotním cyklům a způsobům jejich měření.

Praktická část práce je nejprve věnována posouzení vlivu hodnoty měrného vneseného tepla a intenzity odvodu tepla na geometrii návaru. Na základě zjištěných údajů byly vybrány optimalizované procesní parametry pro mezní hodnoty vneseného tepla a navrženy zkušební návarové desky určené pro měření teplotních cyklů a stanovení jejich vzdálenosti od hranice ztavení. Cílem bylo získat rozložení teplot v celé TOO a samozřejmě i tvary teplotních cyklů. Vybrané teplotní cykly byly aplikovány na jemnozrnnou ocel S460MC a pomocí EBSD analýzy byl zjištěn vliv teplotních cyklů na zhrubnutí zrna.

## **Klíčová slova**

Vnesené teplo, teplotní cyklus, termočlánek, tepelně ovlivněná oblast, ocel S460MC

## **Annotation**

This diploma thesis is focused on how to determinate the heat input influence on the welded joints geometry and the distribution of heat in the heat-affected zone (HAZ) when using MAG welding.

The theoretical part deals with physical quantities required for the description of heat distribution during welding and describes the principal of arc welding methods using a MAG welding method in particular. It is also focused on changes happening in the HAZ, temperature cycling and the ways of their measuring methods.

The empirical part introduces the heat input influence on the weld joints geometry and intensity of the outflow temperature on the welded joints geometry. Based on the data obtained, optimized process parameters were applied to the threshold value of the heat capacity. Consequently, the weld test plates were designed to measure temperature cycles and determine the distance from the melting point. The main aim was to obtain temperature distribution in HAZ as well as shapes of the thermal cycles. The selected temperature cycles were applied on fine grain steel S460MC. Using EBSD analysis provided effect of thermal cycles on the grain coarsening.

## **Key words**

Heat input, thermal cycle, thermal cell, heat affected zone, S460MC steel

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval panu doc. Ing. Jaromíru Moravcovi, Ph. D. za odborné vedení, za pomoc při laboratorních experimentech a za mnoho cenných rad při tvorbě této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval panu doc. Ing. Josefovi Černohorskému, Ph. D. za odborné rady a pomoc s elektrotechnikou, panu Ing. Martinu Švecovi, Ph. D. a paní Ing. Ivě Novákové, Ph. D. za pomoc při laboratorních experimentech.

Také bych rád poděkoval své rodině a přátelům, kteří mě podporovali v průběhu mého studia.

Tato diplomová práce vznikla s podporou v rámci projektu Studentské grantové soutěže SGS-2020-5008 Technické univerzity v Liberci „Vliv zbytkových napětí vznikajících při technologickém zpracování na únavovou životnost vyráběných dílů."

# Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	10
1. Úvod.....	12
2. Teoretická část .....	13
2.1. Šíření tepla v materiálu .....	13
2.2. Fyzikální veličiny.....	16
2.3. Svařování.....	19
2.3.1. Vznik svarového spoje.....	19
2.3.2. Svařování za působení tepla .....	20
2.3.3. Obloukové metody svařování .....	21
2.3.4. Svařování metodou MIG a MAG .....	23
2.3.5. Přenos kovu v oblouku .....	24
2.3.6. Teplotní cykly vznikající při svařování obloukovými metodami.....	26
2.3.7. Definování jednotlivých oblastí v TOO svarových spojů .....	28
2.4. Teplotní cykly .....	32
2.4.1. Stanovení průběhu teplotních cyklů .....	33
2.5. Jemnozrné oceli.....	36
3. Experimentální část.....	40
3.1. Plán experimentů.....	40
3.1.1. Charakteristika materiálů použitých v experimentální části.....	42
3.1.2. Použitá metoda svařování .....	43
3.2. Realizace první fáze experimentů .....	44
3.2.1. Vliv vneseného tepla na geometrii návaru.....	44
3.2.2. Vliv intenzity odvodu tepla na geometrii návaru.....	51
3.3. Měření teplotních cyklů .....	54
3.3.1. Příprava vzorku pro měření teplotních cyklů .....	55

3.4.	Zapojení a aplikace termočlánků typu S .....	64
3.4.1.	Teplotní cykly naměřené pomocí termočlánků typu S .....	67
3.5.	Definování rozložení teplot v TOO pro rozdílné hodnoty Q .....	68
3.6.	Aplikace naměřených teplotních cyklů na jemnozrnnou ocel S460MC .....	73
4.	Diskuze výsledků .....	77
5.	Závěr .....	80

## Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka/symbol	Název	Jednotky
$q$	tepelný tok	[W]
$\vec{g}$	vektor hustoty tepelného toku	[W.m <sup>-2</sup> ]
grad T	gradient termodynamické teploty T	[K. m <sup>-1</sup> ]
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti	[W.m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]
$a$	součinitel teplotní vodivosti	[m <sup>2</sup> . s <sup>-1</sup> ]
$\rho$	hustota	[kg. m <sup>-3</sup> ]
$C_p$	izobarická měrná tepelná kapacita	[J. kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]
$q_0$	tepelný výkon vnitřních zdrojů	[W]
$q_n$	plošný tepelný tok	[W. m <sup>-2</sup> ]
$\alpha$	součinitel přestupu tepla	[W.m <sup>-2</sup> . K <sup>-1</sup> ]
$(T_k - T_s)$	rozdíl teplot mezi kapalinou a stěnou	[K]
$Q$	množství tepla	[J]
$t$	čas	[s]
$S_p$	obsah ploch	[m <sup>2</sup> ]
$h$	vzdálenost mezi plochami	[m]
$\Delta T$	teplotní rozdíl	[K]
$C$	měrná tepelná kapacita	[J. kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]
$m$	hmotnost	[kg]
$T$	teplota	[K]
$V$	konečný objem	[m <sup>3</sup> ]
$V_0$	počáteční objem	[m <sup>3</sup> ]
$\beta$	teplotní součinitel objemové roztažnosti	[K <sup>-1</sup> ]
$\alpha$	teplotní součinitel délkové roztažnosti	[K <sup>-1</sup> ]
$l$	konečná délka	[m]
$l_0$	počáteční délka	[m]
$Q_v$	měrné vnesené teplo	[J.m <sup>-1</sup> ]
$\eta_0$	účinnost přenosu elektrického oblouku	[-]
$U$	svařovací napětí	[V]
$I$	svařovací proud	[A]

$v_s$	rychlost svařování	$[m.s^{-1}]$
$C_e$	uhlíkový ekvivalent	$[hm\%]$
TOO	tepelně ovlivněná oblast	
MAG	metal activegas	
MIG	metal inertgas	
TIG	tungsteninertgas	
MMAW	manual metal arcwelding	
SAW	submergedarcwelding	
PAW	plasma arcwelding	
CGHAZ	coarsegrainedheat-affectedzone	
FGHAZ	fine grainsheat-affectedzone	
ICHAZ	inter-criticalorpartiallytransformedheat-affectedzone	
SCHAZ	sub-criticalheat-affectedzone	
UV	ultraviolet (ultra fialové záření)	
ARA	anizotermický rozpad austenitu	
EBSD	electronbackscatterdiffraction	

# 1. Úvod

Ocel hraje klíčovou roli jako konstrukční materiál ve většině průmyslových odvětví, kde je její použití prakticky neomezeno od stavební ocele používané do základů domů po špičkové nástrojové ocele používané na činné části obráběcích strojů. Právě kvůli tomu, že je její spektrum použití tak rozsáhlé, je v dnešní době kladen důraz na vývoj nových typů ocelí, které mají lepší vlastnosti než ty stávající, ať už mechanické, technologické, případně jiné pro speciální aplikace.

Velmi často však nastává problém, jak spojit jednotlivé ocelové komponenty k sobě tak, aby pokud možno spoj vykazoval stejné, případně lepší vlastnosti než základní spojovaný materiál. V drtivé většině se proto používá některá z mnoha metod svařování, které je v dnešní době na výborné technologické úrovni. Další nedílnou součástí k vytvoření kvalitního svaru s požadovanými vlastnostmi je pokud možno co nejdetailnější znalost procesů a změn, ke kterým dochází v průběhu vlastního svařování, tedy při tepelném ovlivnění materiálu - teplotním cyklu.

V této práci, zaměřené na „Stanovení vlivu vneseného tepla na tvar teplotních cyklů při svařování metodou MAG“, jsou v teoretické části uvedeny základní principy šíření tepla v materiálu, popsány fyzikální veličiny, které tyto principy popisují, a také je zde obecně popsáno svařování. Svařování je pak zaměřeno na posouzení vlivu vneseného tepla a jeho vliv na geometrii návaru, na vliv intenzity odvodu tepla a v neposlední řadě na teplotní cykly. Konkrétně na jejich rozložení v TOO v závislosti na hodnotě vneseného tepla. Díky čemuž bude možné lépe posoudit vliv svařování na strukturní změny a změny mechanických vlastností materiálů.

V experimentální části pak probíhaly poměrně rozsáhlé laboratorní experimenty, kdy byl v prvotních fázích zjišťován vliv vneseného tepla na geometrii návaru, čehož bylo dosaženo různými rychlostmi svařování. Také byl porovnáván vliv intenzity odvodu tepla na tvar a rozměry svaru, čehož bylo dosaženo různou tloušťkou svařovaného materiálu. Z těchto prvotních experimentů byly zjištěny potřebné geometrické parametry pro navazující experimenty a to pomocí série metalografických výbrusů. V další části byly měřeny teplotní cykly sloužící k popisu rozložení teplot v TOO a k analýze toho, jaký mají tyto naměřené teplotní cykly vliv na strukturu materiálu.



## 2. Teoretická část

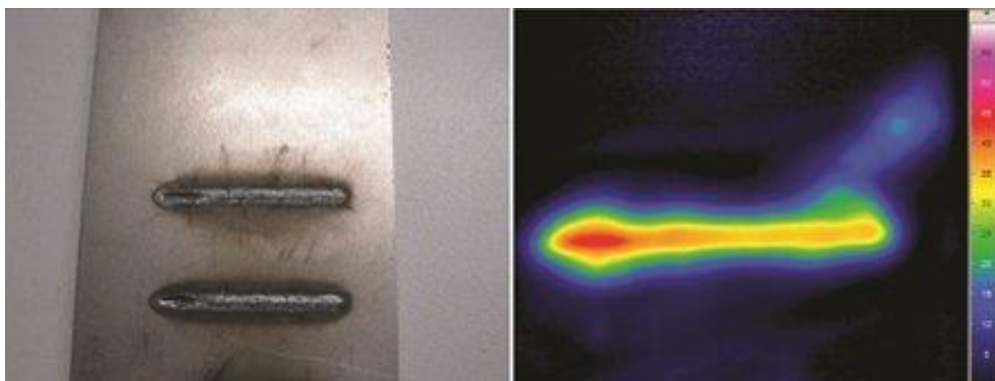
Předložená diplomová práce se v teoretické části zabývá popisem části fyzikálních veličin důležitých pro pochopení fungování tepelných změn v materiálu a pro jejich správné vyhodnocení. Zabývá se procesy šíření tepla při svařování a jeho působení na svařovaný materiál. Pro pochopení těchto procesů je nutné znát princip svařování a teplotní cykly, které při svařování vznikají a to jak obecně, tak konkrétně zde pro metodu MAG, která byla použita v praktické části této práce. V neposlední řadě se zabývá popisem tepelné ovlivněné oblasti (TOO) a změnami, ke kterým v této oblasti dochází. Dále je zde popsána jemnozrnná ocel, která byla použita v experimentální části této práce.

### 2.1. Šíření tepla v materiálu

Svařovací procesy probíhají za podmínek velmi rychle se měnící teploty v poměrně širokém rozsahu. Meze těchto změn jsou určeny jak teplotou okolí, tak teplotou, při které dochází k vypařování kovu. V teplotním intervalu vymezeném těmito mezemi dochází k celé řadě procesů, jako je tavení základního a přídavného materiálu, metalurgické reakce ve svarové lázni, krystalizace svarového kovu, objemové a strukturní změny v nataveném kovu. Do svařovaného místa je přiváděna tepelná energie, díky níž vzniká v základním materiálu teplotní pole (1). [9]

$$T = f(x, y, z, t) \quad (1)$$

Lze rozlišit stacionární a nestacionární teplotní pole, kdy u nestacionárního teplotního pole je teplota nejen funkcí souřadnic bodu, ale i času. V závislosti na tom, zda je teplota funkcí jedné, dvou nebo tří souřadnic, lze rozlišit teplotní pole na jedno-, dvou- a třírozměrná. Příklad rozložení teplotního pole pohledem termokamery lze vidět na Obr. 1. [9]



*Obr. 1 Teplotní pole svaru pohledem termokamery [11]*

Výměna tepla může probíhat vedením (kondukcí), sáláním (radiací) nebo prouděním (konvekcí). Sálání se od ostatních způsobů přenosu tepla odlišuje, protože se jedná o přenos tepla za pomoci elektromagnetického záření, které ke svému přenosu nepotřebuje hmotu. Může se tedy šířit i v prostoru, který není vyplněný látkou (vakuum).

Další dva způsoby vedení tepla: vedení a proudění jsou pro proces svařování mnohem podstatnější. [7]

Vedení tepla je na rozdíl od proudění teoreticky poměrně dobře probádanou záležitostí. Jedná se o jeden z možných způsobů šíření tepla v tekutině a plazmatu, ale o jediný možný způsob šíření tepla v pevných látkách. Částice s vyšší střední kinetickou energií předávají část své pohybové energie částicím s nižší střední kinetickou energií za pomoci srážek mezi sebou. Částice se však nikam nepřemísťují, pouze kmitají okolo svých rovnovážných poloh. Rychlost, se kterou se teplo šíří látkou, pak určuje tepelnou vodivost dané látky, která je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti (viz. další kapitoly). [7]

Vedení tepla se dá rozdělit na stacionární a nestacionární, kdy při stacionárním přenosu se v čase nemění teplotní rozdíl mezi jednotlivými částmi tělesa. Při nestacionárním přenosu tepla se teplotní rozdíly mezi částmi tělesa mění v čase a postupně se vyrovnávají, což je například případ svařování, kdy se teplo postupně šíří od místa svařování.

Pokud se tedy jedná o případ nestacionárního vedení tepla, pak je možné v jakémkoliv čase stanovit v každém bodě teplotního pole tepelný tok  $q(x,y,z)$  [W]. Vektor hustoty tepelného toku  $\vec{g}$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ] je pak získán tak, že je tento tepelný tok vztažen na jednotku plochy v rovině kolmé ke směru toku. Pokud je teplo šířeno vedením v homogenním prostředí, pak platí Fourierův zákon podle vztahu (2). [7]

$$\vec{g} = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad (2)$$

Kde:

grad T gradient termodynamické teploty T ve stejném místě látky [ $\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

$\lambda$  součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]

V běžně využívaných simulačních programech pro tavné svařování je většinou využito pouze přestupu tepla za pomoci vedení a to i v tavné lázni. Pro účely obecných úloh nestacionárního šíření tepla vedením se při výpočtu teplotních polí využívá Fourierova

diferenciální rovnice vedení tepla, která je rozšířená o výkon vnitřních zdrojů, tedy zdrojů tepla vznikajících při materiálových změnách. Jedná se o tzv. obecnou rovnici vedení tepla v homogenním prostředí, tato rovnice je popsána vztahem (3). [7]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{c_p \cdot \rho} \cdot q_0 \quad (3)$$

Kde:

$a$  součinitel teplotní vodivosti [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$\rho$  hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

$C_p$  izobarická měrná tepelná kapacita [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$q_0$  tepelný výkon vnitřních zdrojů, s jakým je teplo generováno v látce o jednotkovém objemu (za 1 s)

Proudění (konvekce) tepla se uskutečňuje pouze při makroskopickém pohybu spojitého prostředí, což je při proudění tekutin. Pokud je proudění vyvoláno samovolně (teplotním rozložením v tekutině, na kterou působí pole objemových sil vyvolané rozdíly v hustotách), jedná se o tzv. volnou (přirozenou) konvekci. Pokud je proudění vyvoláno uměle, jedná se o konvekci nucenou. V případě jednoduché geometrie, znalosti průběhu teplot a jednoznačně definovaném laminárním prouděním lze plošný tepelný tok stanovit za pomoci Fourierova zákona podle vztahu (4). [7]

$$q_n = \alpha \cdot (T_k - T_s) \quad (4)$$

Kde:

$q_n$  plošný tepelný tok [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]

$\alpha$  součinitel přestupu tepla [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$(T_k - T_s)$  rozdíl teplot mezi kapalinou a teplosměnnou stěnou [K]

Ve svarové lázni je však situace mnohem složitější, protože zde dochází k turbulentnímu proudění. Toto proudění se vyznačuje neuspořádaným pohybem molekul. Vznikají zde víry, které neustále promíchávají médium a zvyšují tak intenzitu sdílení tepla a množství tepelné energie přenášejí i do míst více vzdálených od zdroje tepla. V těchto případech lze využít tzv. „Newtonův ochlazovací zákon“. Tento vztah lze však použít pouze za několika předpokladů. Musí být známa velikost součinitele přestupu tepla a jednoznačně určená geometrie teplosměnné plochy, což je ideální případ, např. při výpočtu výměníku tepla.

Ani Newtonův ochlazovací zákon není zcela vhodný pro výpočty proudění ve svarové lázni. To je jedním z důvodů, proč není proudění v tavné lázni ještě dostatečně probádáno. Existují však studie, které se touto problematikou zabývají, jsou však velmi složité a není nezbytné je zde uvádět. Pro dostatečně přesný výpočet je postačující sdílení tepla vedením. [7]

## 2.2. Fyzikální veličiny

Tato část práce popisuje základní fyzikální veličiny, které hrají důležitou roli při definování vzniku a šíření tepla v materiálu. Slouží také pro popis teplotních gradientů, teplotních polí a pro popis pružně-plastického chování materiálů, které byly zatíženy teplotními cykly. Fyzikální veličiny mají jasně definované vlastnosti a vztahy mezi sebou, čímž umožňují opakovat laboratorní experimenty při stejných podmínkách, což zaručuje dosažení použitelných výsledků měření. V případě svařování je situace o to složitější, že do procesu vstupuje velké množství proměnných veličin, proto je třeba chápat tyto fyzikální veličiny i v širších souvislostech a nastavovat podle toho svařovací parametry.

### Tepelná vodivost

Tepelná vodivost (konduktivita)  $\lambda$  je charakterizována vedením tepla látkou. Jedná se o schopnost dané látky vést teplo. Představuje rychlost, se kterou se teplo šíří z teplejší části látky do chladnější části. Tepelná vodivost je charakterizována veličinou, která se nazývá **součinitel tepelné vodivosti** a je definována Fourierovým zákonem. Podle tohoto zákona je vektor hustoty tepelného toku úměrný záporné hodnotě teplotního gradientu podle vztahu (2). V případě ustáleného a zároveň homogenního tepelného toku lze použít názornější vztah (5):

$$\frac{Q}{t \cdot Sp} = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{h} \quad (5)$$

Kde:

$Q$  množství tepla [J]

$t$  čas [s]

$S_p$  obsah ploch kolmých ke směru toku [ $m^2$ ]

$h$  vzdálenost mezi plochami kolmými ke směru toku [m]

$\Delta T$  teplotní rozdíl mezi plochami [K]

Z tohoto vztahu lze vyjádřit součinitel tepelné vodivosti (6):

$$\lambda = \frac{h}{t \cdot S_p \cdot \Delta T} \cdot Q \quad (6)$$

## **Teplotní vodivost**

Teplotní vodivost, kterou lze v literatuře nalézt také pod pojmem tepelná difuzivita, je schopností látky vyrovnat gradient teploty v homogenním prostředí v případě neustálého šíření tepla.

Vztah (7) vyjadřuje teplotní vodivost za pomoci měrné tepelné kapacity při konstantním tlaku.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \quad (7)$$

## **Měrná tepelná kapacita**

Vyjadřuje, jakou tepelnou kapacitu má jeden kilogram látky. Pro lepší představu se jedná o množství tepla, které je potřeba látce o jednotkové hmotnosti (1 kilogram) dodat, aby se ohřála o  $1^\circ\text{C}$  (1 K). Je vyjádřena vztahem (8).

$$c = \frac{dQ}{m \cdot dT} \quad (8)$$

c měrná tepelná kapacita [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

Q množství potřebného tepla [J]

m hmotnost [kg]

T teplota [K]

## Teplotní roztažnost

Většina látek se při ohřevu rozpíná, čímž dochází k rychlejšímu pohybu molekul a k rostoucí vzdálenosti mezi jednotlivými rovnovážnými polohami těchto molekul. Jedná se tedy o jev, kdy se při změně teploty (ohřev, ochlazování) změní délkové rozměry (objem) látky.

Pro tu práci jsou podstatné veličiny:

### Teplotní objemová roztažnost

Jedná se o jev, při kterém je těleso zahřáté o určitou teplotu, čímž změní svůj objem. Objemovou roztažnost lze vyjádřit vztahem (9):

$$V = V_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta T) \quad (9)$$

Kde:

V konečný objem [ $\text{m}^3$ ]

$V_0$  počáteční objem [ $\text{m}^3$ ]

$\beta$  teplotní součinitel (koeficient) objemové roztažnosti [ $\text{K}^{-1}$ ]

$\Delta T$  rozdíl teplot na počátku děje a na konci [K]

### Teplotní součinitel (koeficient) objemové roztažnosti

Jedná se o koeficient úměrnosti, přesný vztah pro definování této veličiny je dán vztahem (10).

$$\beta = \frac{1}{V_0} \cdot \frac{dV}{dT} \doteq 3\alpha \quad (10)$$

Kde:

$\alpha$       teplotní součinitel (koeficient) délkové roztažnosti [ $K^{-1}$ ]

K přesnému určení součinitele  $\beta$  je nutné znát typ změny probíhající v materiálu a podmínky, při kterých změna probíhá. Důležitým parametrem není pouze druh látky, ale silně závisí na teplotě, kterou daná látka má. U většiny látek nabývá tento součinitel kladných hodnot, což v praxi znamená, že se vzrůstající teplotou dochází k nárůstu objemu.

### **Teplotní délková roztažnost**

Jev, při kterém se těleso, které je zahřáté o určitou teplotu roztáhne v daném směru o určitou délku tak, jak je definováno vztahem (11).

$$l = l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (11)$$

Kde:

$l$       konečná délka [m]

$l_0$       počáteční délka [m]

$\Delta T$       rozdíl teplot na počátku a na konci děje [K]

### **Teplotní součinitel (koeficient) délkové roztažnosti**

Jedná se opět o koeficient úměrnosti, kdy přesný vztah pro definici je vztah (11).

$$\alpha = \frac{l}{l_0} \cdot \frac{dl}{dT} \quad (12)$$

## **2.3. Svařování**

### **2.3.1. Vznik svarového spoje**

Svařování kovů, případně slitin, lze charakterizovat jako nerozebíratelné spojení s užitím tepelné či mechanické energie, případně jejich kombinace. K tomuto nerozebíratelnému

spojení dojde vzájemným přiblížením spojovaných povrchů na meziatomové vzdálenosti za působení meziatomových sil a adhezních vazeb.

U pevných látek lze nalézt různé typy vazeb, kdy v každé z těchto vazeb existuje rozdílné rozložení elektronů a iontů. Uspořádání iontů v atomu odpovídá co nejnižší potenciální energii. Základem je mrak valenčních elektronů, kdy se tyto elektrony mohou v mraku volně pohybovat a mohou tak přecházet mezi atomy. Pokud dojde k tomu, že přitažlivá síla mezi kovovými ionty a mrakem valenčních elektronů převyšuje odpudivou sílu elektronů v mraku, dojde ke kovové vazbě. Při tomto procesu je nutné aktivovat kontaktní plochy, k čemuž je potřeba dodání energie na příslušné místo tak, aby došlo k překonání potenciální energie povrchových atomů. [1]

Svařování lze s výhodou dělit právě podle formy této aktivační energie. Pokud dochází k aktivaci za použití tepelné energie, jedná se o tavné svařování. O tavné svařování se jedná i v případě, že je povrch ozářen paprskem (ionty, elektrony, fotony), dochází tak k radiační aktivaci. Poslední možností je aktivace za použití mechanické energie, kdy se jedná o tlakové svařování. Případně lze tyto formy kombinovat a dochází ke svařování za pomoci tepla i tlaku. V této práci bylo použito pouze svařování za působení tepla, a proto mu budou věnovány následující kapitoly. [1]

### **2.3.2. Svařování za působení tepla**

Jedná se o synonymum tavného svařování. Mezi metody tavného svařování lze zařadit následující metody svařování: plamenem, elektrickým obloukem, slévarenské, laserem a EBW, svařování aluminotermické atd.

Při tavném svařování dochází k lokálnímu natavení ploch svařovaných materiálů bez použití tlaku nebo rázů. Zpravidla je používán přídatný materiál, ale není to nezbytné. U heterogenních spojů je nutné, aby spojované kovy byly navzájem svařitelné.

Při vlastním svařování tvoří materiál za působení tepla tavnou lázeň a dochází k natavení svarových ploch. Vzhledem k tomu, že dochází k natavení pouze malé plochy v okolí svaru, liší se krystalizace ve svarové lázni od krystalizace při tuhnutí odlitků. Dále dochází k promísení základního kovu s roztaveným přídatným materiálem. Chemické složení svarového kovu pak může být, podle typu použitého přídatného materiálu obdobné jako u základního materiálu, ale i velmi odlišné. [17]

Teplo, které bylo při procesu svařování vneseno do základního materiálu, vytváří tepelně ovlivněnou oblast. Hodnota vneseného tepla a gradient teploty pak ovlivňují velikost a



rozložení napětí v materiálu, deformace a také strukturní a mechanické změny v tepelně ovlivněné oblasti. [17]

### **2.3.3. Obloukové metody svařování**

V této diplomové práci byla použita metoda obloukového svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu (MAG), a proto ji bude věnována pozornost v následujících kapitolách.

Teplo, které je potřebné ke svařování obloukovými metodami, vzniká v elektrickém oblouku, jenž hoří buď mezi elektrodou a svařovaným materiálem, nebo mezi dvěma elektrodami. Obloukové metody svařování lze rozdělit:

- Ruční obloukové svařování MMAW.
- Svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu TIG.
- Svařování v ochranné atmosféře tavící se elektrodou MIG/MAG.
- Svařování pod tavidlem SAW.
- Svařování plazmatem PAW.

Svařování za pomoci elektrického oblouku je v praxi hojně rozšířené a jedná se o jednu z nejpoužívanějších metod svařování.

Elektrický oblouk, který se používá při svařování, lze charakterizovat jako nízkonapěťový elektrický vysokotlaký výboj, k jehož hoření dochází v prostředí ionizovaného plynu. Ke stabilnímu hoření je nutné splnit předpoklad dostatečného napětí pro ionizaci v daném prostředí a proudu udržujícího plazma v oblouku v ionizovaném stavu. [1]

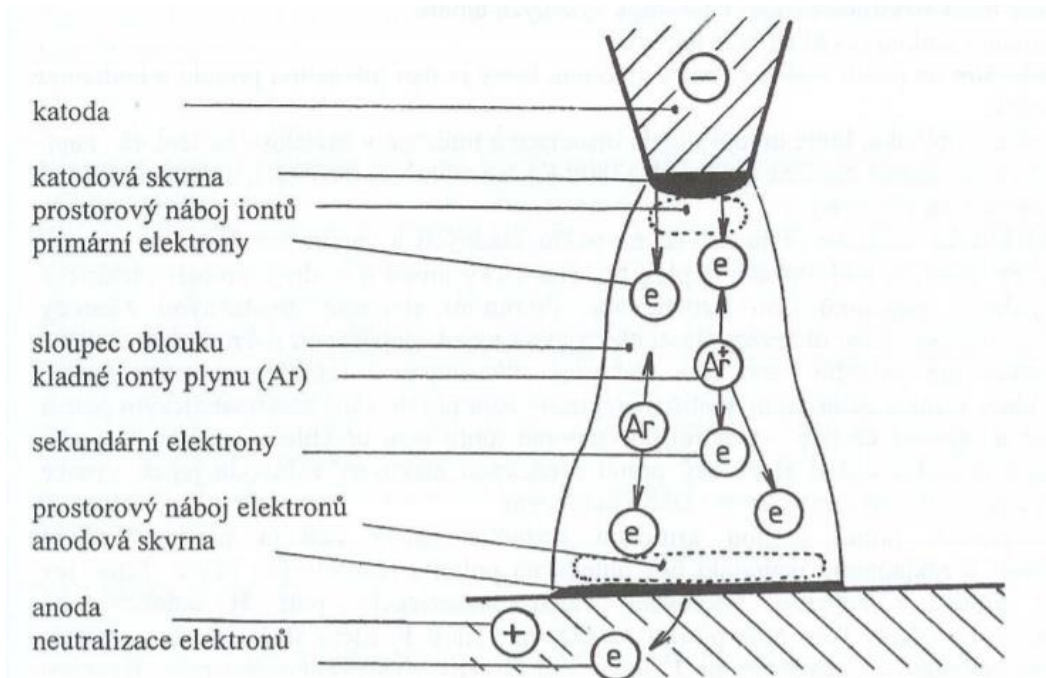
Mezi základní charakteristické znaky elektrického oblouku patří: [1]

- Nízký anodový úbytek napětí
- Velká proudová hustota anodové skvrny
- Nízký potenciální rozdíl na elektrodách
- Proud v řádech jednotek až tisíců ampér
- Intenzivní vyzařování UV záření
- Intenzivní vyzařování světelného záření a to jak ze sloupce oblouku, tak i z elektrod

#### **Části elektrického oblouku**

Vlastní elektrický oblouk se skládá z několika částí, které jsou zobrazeny na Obr. 2.

- 1) Katodová skvrna – nachází se na žhavém povrchu katody. Může být stabilní, případně se po povrchu přemisťovat. V této oblasti dochází k termické emisi prvotních elektronů a jedná se o oblast důležitou pro zapálení oblouku a ionizaci prostředí. Teplota katodové skvrny se pohybuje okolo  $2500^{\circ}\text{C}$  a proudová hustota dosahuje až  $1000 \text{ A/mm}^2$ . [1,3]
- 2) Oblast katodového úbytku napětí – jedná se o oblast přilehající těsně ke katodě s tloušťkou přibližně  $0,1 \text{ mm}$ . Úbytek napětí na katodě je největší.
- 3) Vlastní sloupec oblouku – jedná se o prostor mezi elektrodami s vysokou teplotou, kde se nachází disociovaný a ionizovaný plyn ve formě plazmatu. Pokles napětí v této oblasti je rovnoměrný a proudová hustota ve sloupci je rozložena dle Gaussova rozložení.
- 4) Oblast anodového úbytku napětí – jedná se o oblast přiléhající těsně k anodě s tloušťkou mezi  $0,001 - 0,01 \text{ mm}$ . Dochází zde k přibližně polovičnímu úbytku napětí oproti katodě.
- 5) Anodová skvrna – jedná se o oblast na anodě, kde jsou pohlcovány a neutralizovány záporné částice, které na ní dopadají. Kinetická energie dopadajících částic se zde mění na energii tepelnou a z menší části pak na energii elektromagnetického záření. Teplota na anodové skvrně je okolo  $3000^{\circ}\text{C}$ . [1,3]



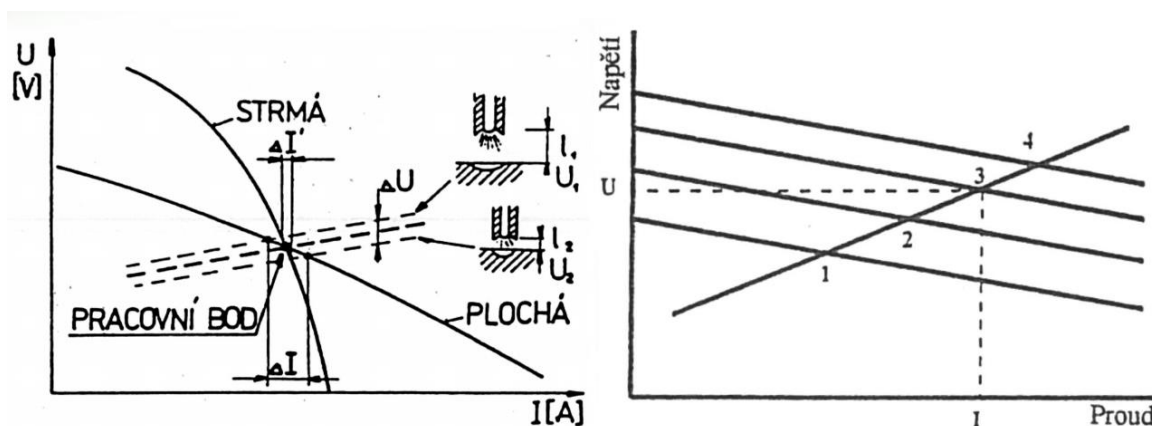
Obr. 2 Schematické znázornění částí elektrického oblouku [1]

### 2.3.4. Svařování metodou MIG a MAG

Zkratkami MIG a MAG je označována metoda ručního, poloautomatického, případně automatického svařování kovů tavící se elektrodou v ochranné atmosféře buď inertního plynu (MIG) nebo aktivního plynu (MAG).

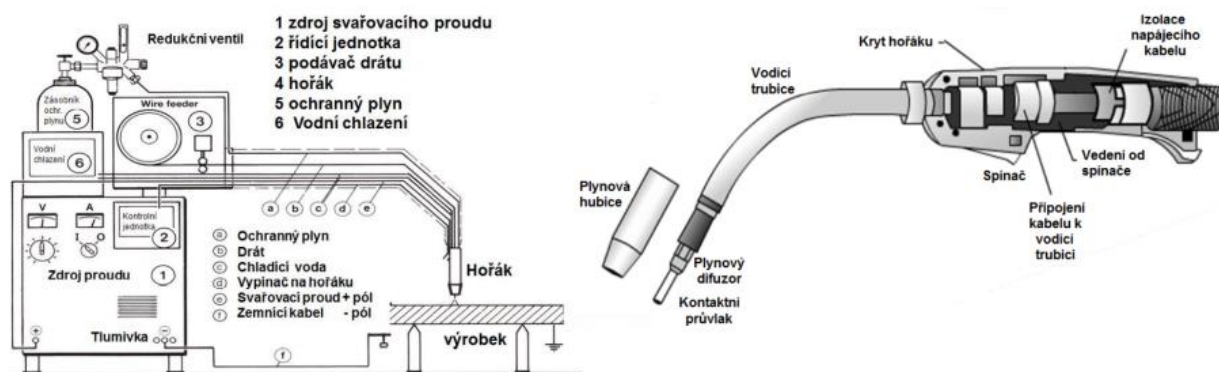
V případě, že se jedná se o poloautomatickou metodu princip, funguje tak, že přídavný materiál je do místa svařování přiváděn motorizovaným pohonem, který si koriguje svářečka. Tento pohon je ovládán samotným svářečem, který stiskne spínač na hořáku a hořák vede ručně. V případě automatického svařování je hořák upevněn nejčastěji na rameni robota, případně v nějakém typu pojezdového ústrojí a sváření probíhá plně automaticky.

Zdroje využívané pro metodu MIG/MAG mají plochou statickou charakteristiku (Obr. 3), jenž umožňuje samoregulační udržování konstantní délky oblouku, což je velmi výhodné a zároveň umožňuje synergické řízení zdroje.[2]



Obr. 3 Statická charakteristika metody MIG/MAG [3]

Přídavný materiál, který je zpravidla navinut na cívce, ze které se odvíjí a je pomocí podávacího ústrojí rovnoměrně podáván přes kontaktní průvlak hořáku do místa svařování, tvoří jednu elektrodu hořícího oblouku. Funkce podavače je zajištěna podávacím mechanismem s pohonem drátu pomocí dvou nebo čtyř kladkových podavačů nebo pomocí kladek s mimoběžnými osami. Podávací kladky mají různý tvar v závislosti na typu podávaného materiálu. Druhou elektrodu tvoří svařovaný materiál, jenž je se svářečkou propojen pomocí zemnicího kabelu. Na Obr. 4 je vidět schéma svařovací soupravy a hořáku pro tuto technologii svařování [2,3]



Obr. 4 Schéma metody MAG/MIG [3]

### Svařovací plyny

Při svařování metodou MAG probíhá svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu, což znamená, že aktivní plyn jednak chrání vlastní svar před přístupem okolní atmosféry a navíc vstupuje do chemických reakcí ve svarové lázni. V praxi se nejčastěji používají aktivní směsné plyny na bázi argonu, jako je například: směs argon +  $O_2$ , argon +  $CO_2$  nebo více složkové směsi argonu s dalšími prvky. Případně lze použít pouze čisté  $CO_2$ . Metodou MAG se díky použití aktivního plynu nejčastěji svařují běžné konstrukční oceli. V případě metody MIG probíhá svařování v atmosféře inertního plynu, který má pouze ochrannou funkci a nezasahuje do chemických reakcí ve svarové lázni. Nejčastěji se používá argon případně směs argon + helium. Metoda MIG je vhodná spíše pro svařování lehkých kovů, jako je například hliník a jeho slitiny, slitiny mědi (zejména bronzy), titan apod. [2]

Optimální průtok ochranného plynu závisí na několika faktorech, z nichž mezi nejdůležitější patří druh svařovaného materiálu, použitý ochranný plyn, nastavené procesní parametry, velikost plynové trysky, poloha svařování, úhel sklonu hořáku a typ spoje. Pro vlastní zjištění průtoku plynu se pak využívají rotametry, což jsou plovákové průtokoměry. [3]

#### 2.3.5. Přenos kovu v oblouku

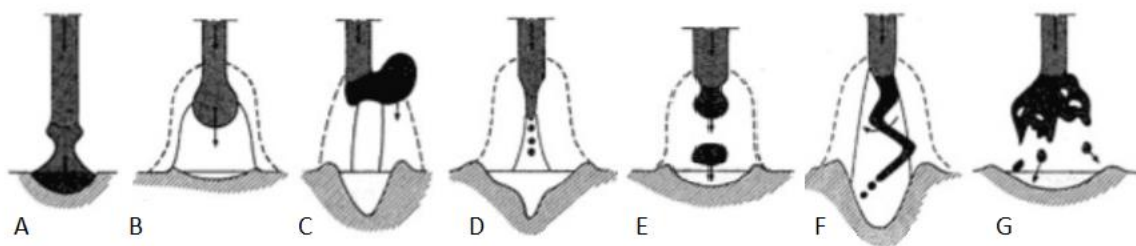
Pojmem přenos kovu v oblouku se rozumí způsob, jakým je natavován konec přídavného materiálu pomocí oblouku. Zároveň je to také popis pohybu již oddělených kapek roztaveného kovu od počátku oddělení se od elektrody až po jejich vmísení do svarové lázně.

Na kapku roztaveného kovu působí několik různých sil, jejichž výslednice má vliv na způsob oddělení kapky od tavící se elektrody a její pohyb v oblouku. Mezi významné síly patří gravitační síla. Působíště této síly je však závislé na poloze, ve které se svařuje, což je zpravidla poloha PA. Mezi další síly patří síla povrchového napětí, bránící kapce odtrhnout se od čela elektrody, dynamické síly vznikající za pomoci kinetiky proudících plynů, síly odpařujících se kovů atd. Podíl jednotlivých sil určuje způsob a charakter přenosu kovu mezi elektrodou a svarovou lázní. [2]

Vůbec nejvýznamnější silou působící na kapku roztaveného kovu je síla elektromagnetická, tato síla umožňuje mimo jiné svařování v různých polohách a určuje výsledný vektor sil působících na kapku. [2]

Způsob přenosu kovu v oblouku patří mezi základní charakteristiky svařovacího procesu a je silně odvislý od procesních parametrů (svařovací proud, napětí na oblouku, rychlost podávání drátu apod.). Způsob a charakter přenosu kovu je také silně ovlivňován složením ochranného plynu, druhem přídatného a základního materiálu a vlastní technikou svařování. [7]

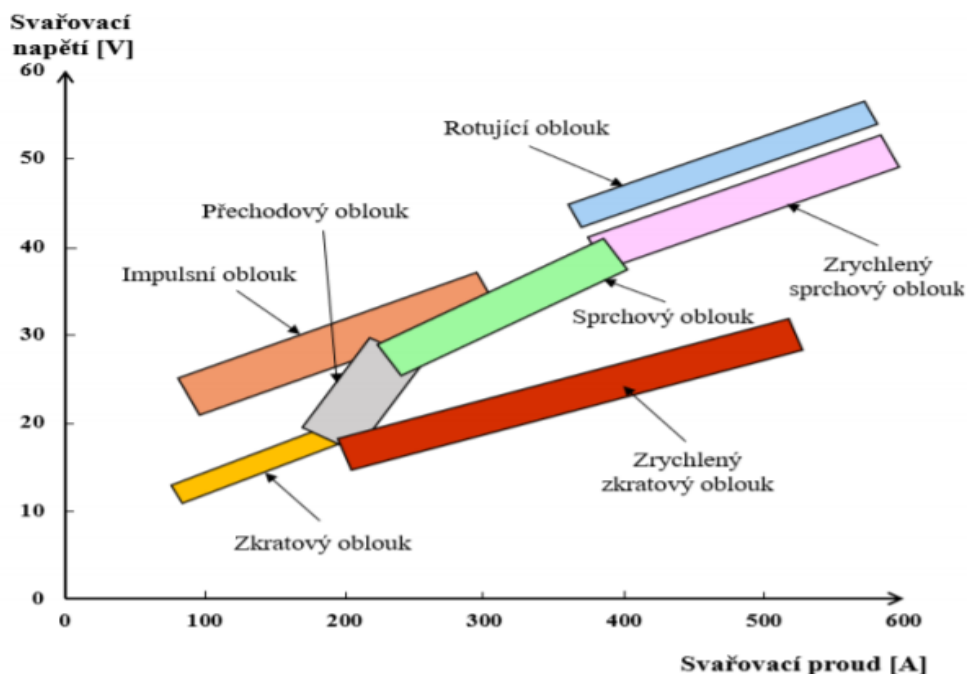
Na Obr. 5 lze vidět jednotlivé způsoby přenosu kovu při svařování v ochranné atmosféře.



**Obr. 5 Základní rozdělení přenosu kovu v oblouku [7]**

- a) oblouk se zkratovým přenosem kovu
- b) oblouk se zrychleným přenosem kovu
- c) přechodový oblouk
- d) oblouk s bezzkratovým přenosem kovu
- e) impulzní bezzkratový oblouk
- f) oblouk s rotujícím přenosem kovu
- g) oblouk s moderovaným bezzkratovým přenosem kovu

Pro lepší názornost je na dalším obrázku (Obr. 6) ukázáno rozložení jednotlivých oblastí přenosu kovu v přehledném systému proud, napětí. Obrázek ukazuje oblasti stability různých typů přechodu kovu.



*Obr. 6 Jednotlivé oblasti přenosu kovu v oblouku [8]*

### 2.3.6. Teplotní cykly vznikající při svařování obloukovými metodami

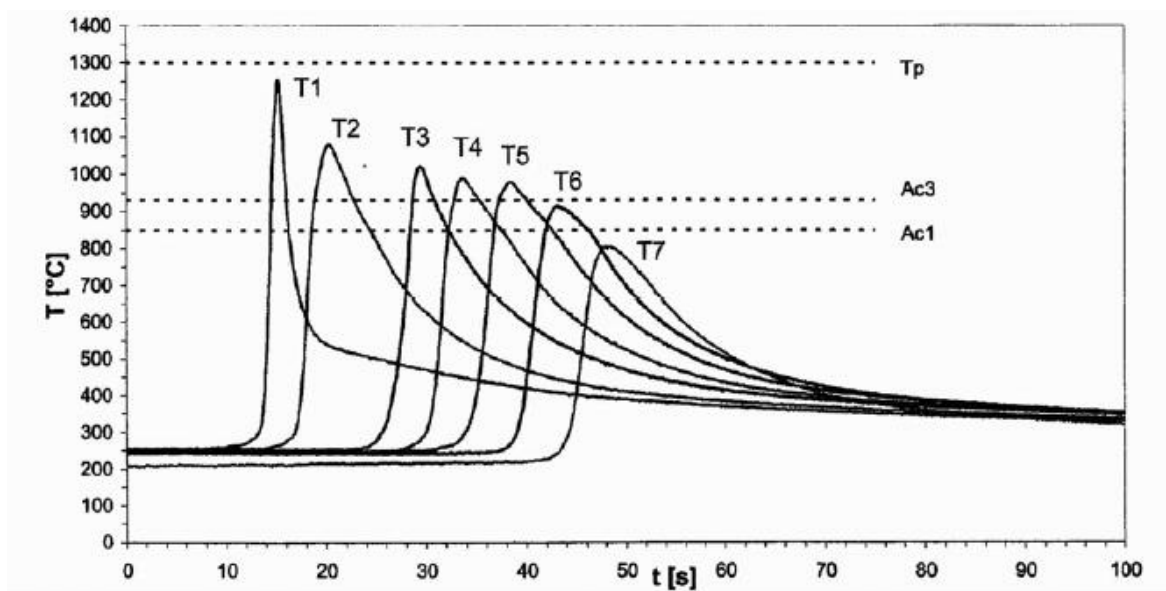
Vliv koncentrovaných zdrojů tepla na svařovaný materiál je u tavných metod svařování posuzován pomocí teplotního cyklu. Podle těchto cyklů se dá usuzovat, k jakým strukturním změnám v daném materiálu dojde a také jsou velmi důležité pro posouzení vlivu svařování na mechanické a křehkolomové vlastnosti svarového spoje. Znalost teplotních cyklů je také základem při modelování svařovacího procesu pomocí některého z mnoha simulačních programů. [5]

#### Vlastní teplotní cyklus při svařování

Za vznik teplotního cyklu při svařování je odpovědný zdroj tepla, který působí v oblasti svarového spoje a má za následek termickou aktivaci svařovaného povrchu.

Teplo, které je do svaru přivedeno, se materiálem dále šíří vedením a má pak za následek změnu mikrostruktury a změnu mechanických vlastností. Tyto změny lze předpovídat na základě znalosti průběhu jednotlivých teplotních cyklů v tepelně ovlivněné oblasti spoje.

Vlastní teplotní cyklus vyjadřuje závislost teploty na čase v daném konkrétním měřeném místě, nejčastěji v TOO blízko hranice ztavení. Pro ilustraci je na Obr. 7 uveden charakteristický průběh teplotních cyklů v TOO. Jedná se o teplotní cykly získané při svařování oceli P91, kde byly měřící termočlánky umístěny v různých vzdálenostech od hranice ztavení. [6]

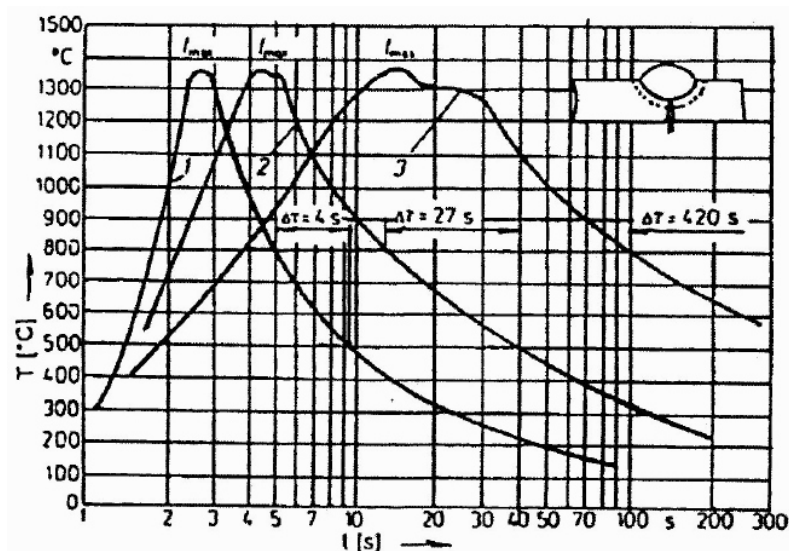


**Obr. 7** Průběh teplotních cyklů v různé vzdálenosti od hranice ztavení, změřených při tavném svařování oceli P91 [14]

Ve vlastním teplotním cyklu lze definovat několik oblastí, v nichž dochází k různým změnám teploty. Jedná se o oblast ohřevu, kde dochází k nárůstu teploty z počáteční teploty až na maximální teplotu v daném cyklu. Maximální teplota a také čas strávený na určité vysoké teplotě velmi významně ovlivňuje intenzitu zhrubnutí zrna. Čím delší je daný čas, tím je zhrubnutí zrna větší.

Rychlost ohřevu na maximální teplotu je dána několika faktory, jedná se především o fyzikální vlastnosti daného materiálu, intenzitu použitého zdroje tepla a použitou metodu svařování.

Po dosažení maximální teploty se přechází k ochlazovací fázi teplotního cyklu, u které opět závisí její průběh na vlastnostech materiálu, zdroji tepla, okolním prostředí a metodě svařování. Platí, že čím vyšší je ochlazovací rychlost v oblasti transformačních teplot, tím roste pravděpodobnost získání nerovnovážných struktur. Významný rozdíl ve tvaru teplotních cyklů v závislosti na použité metodě svařování ilustruje Obr. 8. [6]



**Obr. 8 Různé tvary teplotních cyklů v podhousenkové oblasti [6]**

*1 - svařování elektrickým obloukem obalenou elektrodou*

*2 - svařování automatem pod tavidlem, 3 - elektrostruskové svařování*

Vzhledem k tomu, že v experimentální části práce nebyly použity svary s více housenkami, nebudou zde uvedeny vícenásobné cykly, které sledují více svarových housenek.

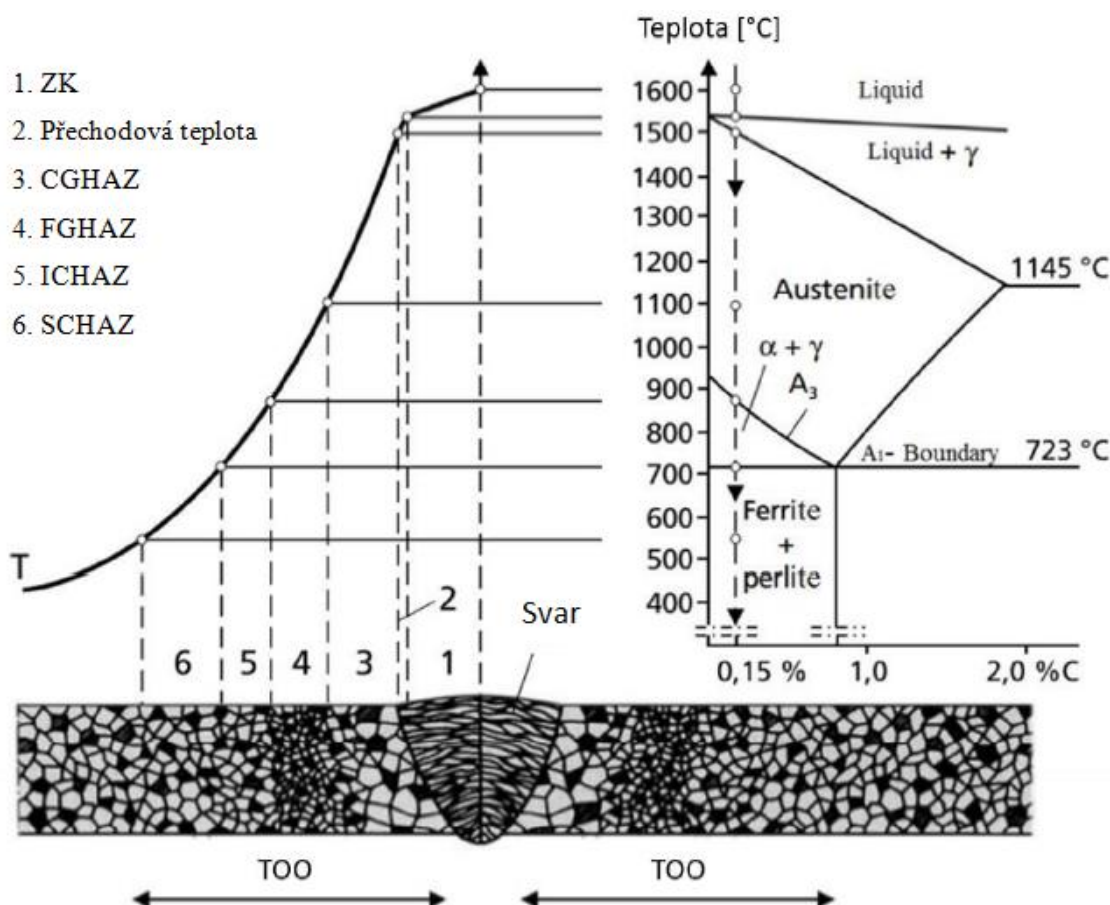
Teplotní cykly jsou nejčastěji charakterizovány následujícími parametry: [6]

- Rychlost ohřevu nebo čas potřebný k ohřevu na maximální teplotu
- Maximální dosažená teplota ve svarovém cyklu
- Čas výdrže nad teplotami  $A_{c1}$ ,  $A_{c3}$  a teplotou přehřátí  $T_{př}$
- Rychlost ochlazování

### 2.3.7. Definování jednotlivých oblastí v TOO svarových spojů

Při svařování dochází ve svaru ke vzniku teplotních gradientů. Časovou změnu teploty lze v každém bodě svaru popsat pomocí teplotních cyklů. Na jejich základě pak dochází v TOO ke změnám vlastností (materiálovým, strukturním, mechanickým). Ovlivnění dílčích oblastí závisí na tom, jaká je její vzdálenost od tepelného zdroje, respektive hranice ztavení. Z těchto důvodů lze TOO rozdělit na čtyři hlavní části. Jedná se o podhousenkovou oblast (CGHAZ), normalizovanou oblast (FGHAZ), oblast s částečnou překrystalizací (ICHAZ) a oblast subkritickou (SCHAZ). Rozdělení těchto oblastí je ukázáno na schematickém obrázku (Obr. 9). [12]





Obr. 9 Rozdělení TOO na hlavní zóny [12]

**Podhousenková oblast (CGHAZ - coarsegrainedheat-affectedzone)** je oblastí nacházející se nejbližše svarovému kovu a jsou zde teploty dosahující až 1500 °C. Tato oblast má poměrně hrubozrnnou strukturu, kdy nejhrubší zrna se nacházejí v oblastech s nejvyšší teplotou. Zrna mají 5 - 15-krát větší velikost oproti základnímu materiálu. Na šířku oblasti a intenzitu zhrubnutí zrna v této oblasti má zásadní vliv chemické složení materiálu a hodnota tepelného příkonu. Vzhledem k tomu, že při zhrubnutí zrna dochází i ke snížení houževnatosti, je tato zóna nejkritičtější, co se týká křehkolomových vlastností svaru.

Další oblastí je **oblast normalizace (FGHAZ - fine grainsheat-affectedzone)**. Rozmezí teplot se zde pohybuje od 900 °C do 1100 °C. V této oblasti se nachází jemnozrnná struktura a tudíž má i lepší mechanické vlastnosti, především houževnatost.

V oblasti s **částečnou překrystalizací (ICHAZ- inter-criticalorpartiallytransformedheat-affectedzone)** se teploty pohybují mezi 700 °C - 900 °C, struktura je zde hrubozrnnější než v normalizační oblasti, s čímž je spojena i nižší houževnatost.

Poslední oblastí je **oblast subkritická (SCHAZ - sub-critical heat-affected zone)**. Jedná se o okrajovou oblast TOO, kde je maximální teplota nižší než 700°C. V této oblasti již nedochází ke změnám mikrostruktury ani velikosti zrna. Může však docházet k vyloučení karbidů, což může v konečném důsledku vést k poklesu houževnatosti a u ocelí s vyšší pevností také ke změkčení výsledné struktury. [12]

### Vliv velikosti vneseného tepla

Výsledná struktura, velikost zrn, mechanické vlastnosti a velikost tepelně ovlivněné oblasti závisí především na množství vneseného tepla, chemickém složení materiálu a charakteru teplotního zatížení (cyklu). Velmi často jsou pro svary uváděny doporučené hodnoty různých veličin, které by měli být dodrženy, aby svary dosahovaly požadované kvality. Jedná se především o velikost vneseného tepla, parametr  $t_{8/5}$ , teplotu předehřevu a teplotu interpass.

Tyto parametry se předepisují v závislosti na typu struktury a chemickém složení oceli, která je svařována. Předehřev a vnesené teplo mají velmi významný vliv na tvar a šířku TOO a samozřejmě i na šířku jednotlivých pásem. S narůstající teplotou předehřevu a vneseným teplem dodaným do místa svařování, se TOO rozšiřuje a roste její objem, což znamená zvětšení oblasti se změnou mechanických vlastností. Také je z hodnot měrného tepla možné usuzovat na velikost deformačních a napětových polí a zároveň tato veličina udává limitní hodnoty pro svařování vybraných druhů materiálů. Hodnotu měrného tepla (tepla vneseného na jednotku délky svaru) lze vypočítat podle vztahu (13). [12]

$$Q_v = \eta_0 \cdot \frac{U \cdot I}{v_s} \quad (13)$$

Kde:

$Q_v$  měrné vnesené teplo [ $\text{J} \cdot \text{m}^{-1}$ ]

$\eta_0$  účinnost přenosu elektrického oblouku [-]

$U$  svařovací napětí [V]

$I$  svařovací proud [A]

$v_s$  rychlost svařování [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Hodnoty účinnosti přenosu elektrického oblouku pro jednotlivé metody svařování udává Tab. 1.

**Tab. 1 Koeficienty účinnosti přenosu elektrického oblouku při jednotlivých metodách svařování**

Č. metody	Metoda svařování	Koeficient $\eta$
121	svařování pod tavidlem drátovou elektrodou	1
111	ruční obloukové svařování obalenou elektrodou	0,8
114	obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochranného plynu	0,8
131	obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu: MIG	0,8
135	obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu: MAG	0,8
136	obloukové svařování tavidlem plněnou elektrodou v aktivním plynu	0,8
137	obloukové svařování tavidlem plněnou elektrodou v inertním plynu	0,8
138	obloukové svařování kovem plněnou elektrodou v aktivním plynu	0,8
139	obloukové svařování kovem plněnou elektrodou v inertním plynu	0,8
141	obloukové svařování wolframovou elektrodou v inert. plynu: WIG	0,6
15	plazmové svařování	0,6

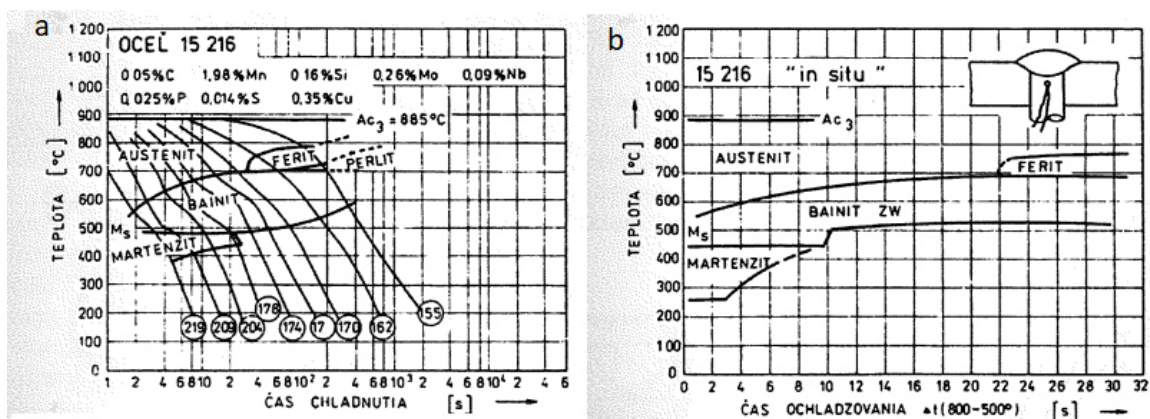
Dalším důležitým parametrem je parametr  $t_{8/5}$ . Jedná se o parametr času ochlazování mezi teplotami 800 - 500 °C. Zkrácení času  $t_{8/5}$  vede k zúžení tepelně ovlivněné oblasti a tím pádem i ke zmenšení oblastí se změnou mechanických vlastností. Snížení tohoto parametru také vede k menšímu úbytku tvrdosti ve svarovém spoji. Zkrácení parametru  $t_{8/5}$  lze docílit zvýšením intenzity odvodu tepla z oblasti svařování, například přidáním externího chlazení.

**Teplota interpass** nebo také mezihousenková teplota je teplotou určenou při vícevrstevném svařování. Jedná se o hodnotu, pod kterou musí klesnout teplota housenky předchozí, než se započne se svařováním housenky následující. Tento parametr je důležitý z hlediska vzniklé struktury v TOO a také zachování co nejlepších mechanických vlastností svarového spoje. Interpass teplota by neměla překročit teplotu předehřevu + 100°C. Pokud se jedná o svařované konstrukce z kvalitnějších ocelí, jako jsou například vysokopevnostní ocele (X70, X80, X100 atd.), je nutné dodržet doporučení daná normami a doporučení od výrobce. [20]

## 2.4. Teplotní cykly

Naměřené nebo nasimulované průběhy křivek teplotních cyklů v jednotlivých pásmech TOO svarového spoje slouží především pro určení předpokládané struktury, která vznikne ve svarovém spoji. Při tomto určování je důležité znát ARA diagram zkoumané oceli, kdy lze následně na základě předpokládané dosažené struktury upravovat postupy svařování a předpovídat mechanické vlastnosti svarového spoje. Z In-situ ARA diagramu lze stanovit parametr  $t_{8/5}$  pro požadovanou strukturu a na jeho základě vypočítat potřebné procesní parametry obloukového svařování pro dosažení této struktury.

Vzhledem k tomu, že klasický ARA diagram je vytvořen za jiných podmínek rychlosti ohřevu na austenizační teplotu, výdrže a ochlazování z této teploty, než je tomu při svařování, je výhodnější používat „svářečské“ in-situ ARA diagramy. In situ ARA diagram je konstruovaný pro podmínky svařování a nemá na ose x čas, ale právě parametr  $t_{8/5}$ . Rozdíl mezi těmito diagramy ilustruje Obr. 10.



Obr. 10 Anizotermické diagramy rozpadu austenitu a) klasický, b) ARA diagram „in situ“ [6]

Tyto znalosti jsou výhodné v tom, že je v praxi poměrně složité zkoumat detailní mikrostrukturu a mechanické vlastnosti v jednotlivých oblastech TOO kvůli malým rozměrům jednotlivých částí. V dnešní době se proto často používají různé simulační (modelovací) metody pro stanovení teplotních a deformačních cyklů při svařování. Tato technika velmi zrychluje a usnadňuje studium svařovaného materiálu, protože není nutné dělat složité metalografické výbrusy a zkoumání struktury pomocí mikroskopu.

Simulační programy umožňují nasimulovat různé varianty teplotních cyklů v TOO a porovnat je s napětovými cykly zkušebních těles. Teplotní cykly se nejčastěji modelují na válcových tyčích pro zkoušku tahem, případně na hranolech. Všechny tyto vzorky mají

normalizované rozměry kvůli snadnějšímu a opakovatelnému měření. Vzorek je zahřátý nejčastěji elektrickým odporovým nebo indukčním ohřevem, například simulátor Gleeble, Smitweld apod. Teplotní cyklus se namodeluje a následně se aplikuje na zkoumaný vzorek materiálu, což bylo experimentálně provedeno i v této práci. [6]

#### 2.4.1. Stanovení průběhu teplotních cyklů

Existují dvě základní metody pro stanovení průběhu teplotních cyklů při svařování a to měřením nebo výpočtem. V této práci byla využita metoda měřením, kdy byly provedeny laboratorní experimenty.

Jednou z nejdůležitějších operací při vlastním měření teplotních cyklů je správný záznam dynamiky růstu teploty ve velmi krátkém čase a navíc v prostředí silných elektromagnetických polí. K tomu je třeba použít dynamicky odstíněných ústředěn, sběrnic s dostatečnou frekvencí záznamu a samozřejmě také termočlánků s dostatečně rychlou odezvou. Velmi důležité je pak zvolení správného typu termočlánku v závislosti na předpokládané teplotě v měřeném místě a také volba správné vzdálenosti měřeného místa od tepelného zdroje a od hranice ztavení. Základní typy používaných termočlánků včetně jejich teplotního rozsahu jsou ukázány v tabulce (Tab. 2). [6].

**Tab. 2 Typy termočlánků**

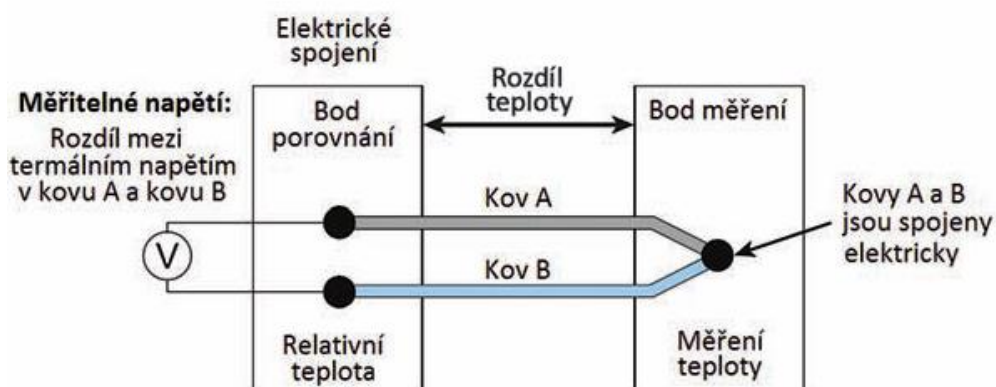
Typ termočlánku	Maximální teplota vhodného použití
Fe – Konstantan	do cca 600°C
NiCr – Ni	do cca 1200°C
PtRh – Pt	do cca 1500°C
WRe – W	ve svarovém kovu

#### Princip fungování termočlánku

Měření s termočlánky patří mezi nejvýznamnější a nejčastější způsoby měření teploty a to nejen ve strojírenství, ale i v ostatních oborech. Termočlánek funguje tak, že převádí teplotu na elektrické napětí pomocí tzv. *Seebeckova jevu*. Při tomto jevu vlastně dochází k přeměně teplotních rozdílů na měřitelné elektrické napětí.

V praxi to pak znamená, že pokud mezi dvěma konci kovové tyčky existuje teplotní gradient  $\Delta T$ , pak musí existovat i termoelektrické napětí mezi nimi. Je však nutné, aby tento obvod byl tvořen minimálně dvěma různými materiály (Obr. 11). Velikost získaného

napětí závisí na druhu použitého materiálu vodiče a na teplotním rozdílu mezi teplým a studeným koncem vodiče. [10]



Obr. 11 Schéma termočlánku [13]

Samostatné termočlánky se s výhodou využívají jako čidla teploty v řádech stovek stupňů, v závislosti na druhu termočlánku a jeho složení. Mají také dobrou citlivost v řádech desítek mikrovoltů na °C. Termočlánků je mnoho druhů dělených podle maximálních použitelných teplot a kovů, ze kterých jsou vyrobeny (Obr. 12). [10]

Označení termočlánku dle IEC 584	Složení	Měřicí rozsah [°C]	Původní označení
T	Cu-CuNi	-200 až +350	Cu-ko
J	Fe-CuNi	-200 až +750	Fe-ko
E	NiCr-CuNi	-100 až +900	ch-ko
K	NiCr-NiAl	-200 až +1200	ch-a
N	NiCrSi-NiSi	-200 až +1200	---
S	PtRh10-Pt	0 až +1600	PtRh10
R	PtRh13-Pt	0 až +1600	PtRh13
B	PtRh30-PtRh6	+300 až +1700	PtRh18
Označení termočlánku dle DIN 43710	Složení	Měřicí rozsah [°C]	Původní označení
L	Fe-CuNi	-200 až +900	Fe-ko
U	Cu-CuNi	-200 až +600	Cu-ko

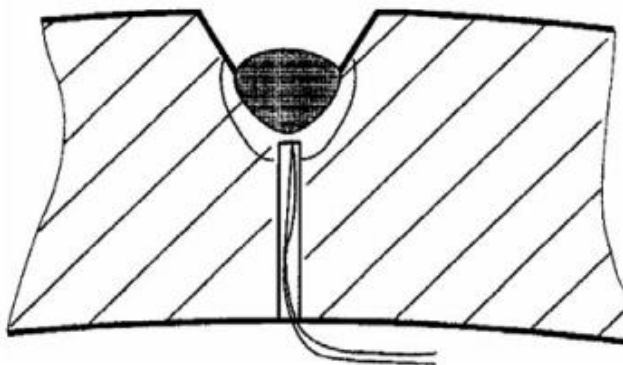
Obr. 12 Základní druhy termočlánků [15]

S ohledem na to, že teplotní cykly se poměrně výrazně mění s rostoucí vzdáleností od hranice ztavení, je nutné, aby měl spoj termočlánku s měřeným místem co nejmenší rozměr. Proto se při těchto aplikacích používají termočlánky s co nejmenším průměrem

obvykle do 0,5 mm. Další výhodou těchto malých termočlánků je jejich nízký tepelný obsah, což přispívá k přesnosti měření. K získání kvalitních výsledků je také nutné zajistit přímý kontakt termočlánku s měřeným materiálem, což se prakticky provádí tak, že je konec termočlánku přivařen kondenzátorovou impulzní svářečkou do místa měření.

Kvůli ještě většímu zvětšení přesnosti je vhodné použít co nejkratší termočlánek a ke spojení s měřicím přístrojem využít kompenzační vedení. Data z termočlánku jsou následně vyhodnocována pomocí vyhodnocovacího software.

V našem případě, tj. měření teplotního cyklu uvnitř materiálu, se používá metoda přivaření termočlánku dovnitř válcové díry, která je k tomu určená a nachází se v požadovaném místě a hloubce (Obr. 13). Děr je možno vytvořit několik v různých vzdálenostech od hranice ztavení pro získání lepšího přehledu o tepelných procesech uvnitř materiálu. [6]



**Obr. 13** Schéma měření teplotního cyklu [6]

Určitou alternativou při měření teplotního rozložení ve svarovém spoji je metoda termovizního měření, které však i přes pokročilou technologii nedosahuje dostatečné přesnosti. Z důvodu poměrně vysoké složitosti a nákladnosti vlastních experimentů je v praxi hojně využíváno matematického výpočtu teplotního cyklu. Tyto výpočty jsou však velmi složité a v této práci byla využita metoda laboratorního měření popsaná výše.

## 2.5. Jemnozrnné oceli

U klasických nelegovaných konstrukčních uhlíkových ocelí jsou mechanické vlastnosti určovány především obsahem uhlíku a manganu. Lze říci, že jsou zpevňovány především intersticiálním a substitučním mechanismem. Pevnost a mez kluzu nelegovaných konstrukčních ocelí lze však zvednout i jinou možností a to tak, že je ocel dolegována malými obsahy prvků jako Al, Nb, Zr, Ti a V. Materiál si pak zachovává dobrou houževnatost a je částečně potlačen nepříznivý vliv uhlíku na svařitelnost daného materiálu. Hlavní výhoda spočívá v tom, že tyto prvky umožňují vznik jemnozrnné struktury a svojí vazbou na uhlík a dusík zvyšují pevnostní vlastnosti materiálu za pomoci precipitačního zpevnění. [16]

Polotovary z jemnozrnných ocelí se nejčastěji vyrábějí za pomoci řízeného válcování spojeného s tepelným zpracováním, které ještě zvýrazní vliv mikrolegujících prvků (Al, Nb, Zr, Ti a V), proto se pro tyto materiály často používá název mikrolegované jemnozrnné oceli. Obsahy mikrolegujících prvků jsou však obvykle limitovány Al min. 0,015 hm %, Nb max. 0,06 hm %, V max. 0,2 hm % a Ti max. 0,15 hm %. Tyto prvky tvoří spolu s uhlíkem, karbidy, karbonitridy a nitridy. Zásadní výhody jemnozrnných mikrolegovaných ocelí jsou následující: [16]

- Zvýšení meze kluzu a pevnosti materiálu díky precipitačnímu vytvrzování, při zachování velmi dobré tažnosti.
- Precipitáty, které jsou součástí mikrostruktury oceli do velikosti cca 50 nm, brání migraci hranic zrn při rekrytalizaci a tím vzniká jemnozrnná struktura materiálu.
- S tím souvisí i velmi dobrá odolnost proti křehkému porušení (vysoké hodnoty nárazové práce) a tedy využitelnost při teplotách až do -80 °C.
- Tyto oceli nestárnou, protože precipitáty mikrolegujících prvků váží část intersticiálního dusíku, čímž klesá šance na vznik nitridů železa, které způsobují stárnutí oceli.
- Uhlíkový ekvivalent je snížen, čímž se zlepšuje houževnatost a svařitelnost oceli. Je však třeba limitovat hodnoty měrného tepla, protože s rostoucí velikostí zrna klesají mechanické vlastnosti i hodnota nárazové práce.

Jako příklad mikrolegované jemnozrnné oceli lze uvést ocel S700MC, která se používá například pro výrobu náprav, rámu podvozku osobních i nákladních automobilů, výrobu jeřábů apod. V tabulce (Tab. 3) je uvedeno chemické složení oceli dle ČSN EN. [9]



**Tab. 3 Maximální hodnoty prvků v hmotnostních procentech pro ocel S700MC**

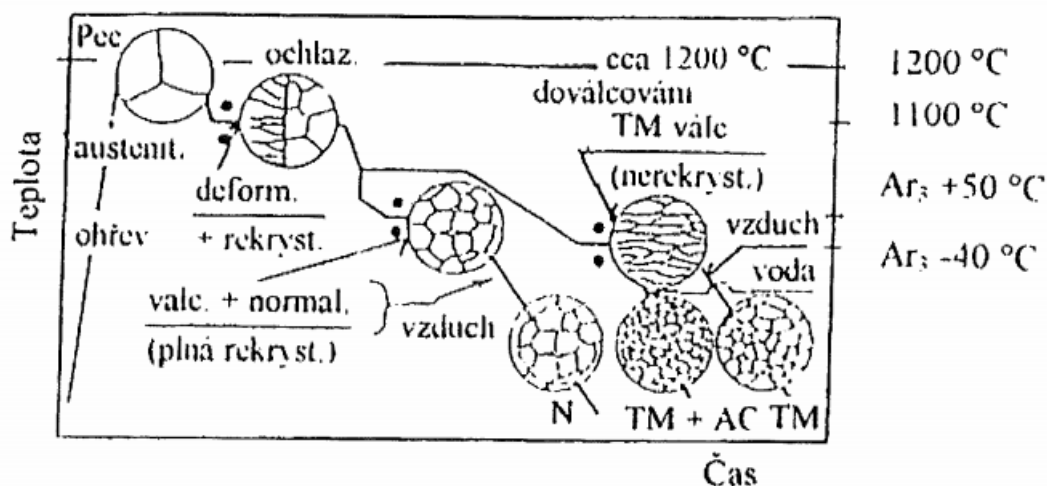
C	Si	Mn	P	S	Al
0,12	0,60	2,10	0,025	0,015	0,015
Nb	V	Ti	Mo	B	
0,09	0,20	0,22	0,50	0,005	

### Termomechanicky zpracované jemnozrnné vysokopevnostní oceli

Termomechanické zpracování oceli je poměrně nekonvenční způsob výroby polotovarů, protože je potřeba hlubších znalostí v oblasti teorie dislokací. Materiál se zpevňuje nejen mechanismy substitučního, intersticiálního a precipitačního zpevnění, ale je zde významným parametrem hustota dislokací a tedy dislokační zpevnění.

Mezi základní způsoby termomechanického zpracování je možné řadit:

**Termomechanické zpracování metodou řízené válcování**, které probíhá za přesně sledované teploty, času a velikosti deformace, čímž získá výsledný materiál velmi jemné austenitické zrna, které se při rychlém ochlazení transformuje na jemnozrnný ferit. Vedle jemnozrnné struktury je dosaženo i eliminace perlitických pásů. Vliv řízeného válcování a řízeného ochlazování je zobrazen na Obr. 14. [16]

**Obr. 14 Vliv řízeného válcování a řízeného ochlazování na velikost zrna [16]**

**Termomechanické zpracování deformací před transformací.** Tento způsob je nejběžnější a lze ho rozdělit ještě na:

- Vysokoteplotní termomechanické zpracování, které je charakteristické tvářením v oblasti stabilního austenitu, kdy následuje rychlé ochlazení, které musí proběhnout rychleji než rekrytalizace. Takto zpracovaný materiál má zvýšenou pevnost a lomovou houževnatost. [16]
- Nízkoteplotní termomechanické zpracování, jež je založeno na deformaci (cca 50%) nestabilního austenitu během inkubační periody a následným zakalením se vznikem martenzitu, který je následně popouštěn při teplotách nižších než 200°C. [16]

### **Deformace během transformace**

U uhlíkových ocelí se termomechanického zpracování dosahuje tvářením (nad 60 %) po rychlém ochlazení z austenitizační teploty v průběhu perlitické transformace při teplotách mezi 600 – 700°C, kdy následuje ochlazení na vzduchu. Při tomto způsobu zpracování je dosaženo pouze malého zvýšení pevnosti, ale razantně vzroste houževnatost zpracovaného materiálu. Materiál lze ještě deformovat v průběhu bainitické transformace a následně jej zakalit, kdy vzniká struktura se směsí martenzitu a spodního bainitu. Takto zpracovaná ocel má zvýšenou pevnost oproti nízkoteplotnímu termomechanickému zpracování, ale sníží se houževnatost materiálu. [16]

### **Deformace po transformaci**

Tento způsob zpracování se vyznačuje malou deformací martenzitu za studena ( 1 – 5%) mezi prvním a druhým popouštěním, případně přímo při popouštěcí teplotě. Materiál má podstatně zvýšenou mez kluzu za cenu snížení hodnot tažnosti a lomové houževnatosti. [16]

### **Svařitelnost jemnozrnných ocelí**

Při svařování jemnozrnných ocelí dochází k růstu zrn v tepelně ovlivněné oblasti a tím dochází k poklesu mechanických i plastických vlastností. Je vhodné tyto oceli svařovat bez předehřevu s limitovaným měrným teplem vneseným do místa svařování, aby došlo ke vzniku co nejmenšího ovlivnění vlastností, jak v místě přehřátí v blízkosti hranice ztavení,

tak ve „změkčené oblasti“, kde dochází k vyžhání struktury těsně pod teplotou  $A_1$ . Pokud je nutnost svařovat s předeřevem, volí se nižší teploty obvykle v rozmezí 100 – 150 °C.

Významný vliv na svařitelnost má chemické složení. Pro mikrolegované jemnozrnné oceli je doporučeno používat pro výpočet ekvivalentu uhlíku následující rovnici (14), kde jsou prvky dosazeny v hm%: [16]

$$C_E = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (14)$$

Kde:

$C_E$  uhlíkový ekvivalent [hm%]

Uhlíkový ekvivalent vyjadřuje vliv jednotlivých legujících prvků na kalitelnost oceli. Čím lépe se dá daný materiál zakalit, tím roste riziko vzniku křehkých zakalených struktur v tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje a tím hůře se ocel svařuje. Platí tedy, že čím je hodnota  $C_E$  vyšší, tím více je třeba volit technologická opatření, jako je teplota předeřevu a hlídání interpass teploty. Při svařování dvou ocelí lišících se chemickým složením je nutné posuzovat tu s vyšším uhlíkovým ekvivalentem. [16]

### 3. Experimentální část

V experimentální části se tato práce zabývá především vlivem vneseného tepla na geometrii návaru a na tvar teplotních cyklů, které vznikají při různých hodnotách měrného vneseného tepla v tepelné ovlivněné oblasti. K tomu, aby bylo dosaženo různých hodnot měrného vneseného tepla, bylo použito několik rozdílných svařovacích rychlostí, při zachování ostatních svařovacích parametrů. Nejprve však bylo nutné provést zkušební experimenty, které se zabývaly především vlivem měrného vneseného tepla na geometrii návaru, hledáním ustálené oblasti svařování - tedy vhodné oblasti pro umístění termočlánků při měření teplotních cyklů a zkoumáním vlivu intenzity odvodu tepla na vlastní návar. Tyto zkušební měření se ukázaly jako náročné a k získání dostatečného množství použitelných výsledků bylo nakonec nutno udělat více než 40 metalografických výbrusů.

Výsledky z první fáze experimentů byly následně použity ke stanovení okrajových podmínek nutných pro měření teplotních cyklů, kdy byly termočlánky kondenzátorově přivařeny jak do otvorů v definovaných vzdálenostech od předpokládané hranice ztavení, tak na povrch materiálu v těsné blízkosti svarové lázně. Získané teplotní cykly pak byly v dilatometru DIL 805L aplikovány na vzorky z jemnozrnné oceli S460MC s následným posouzením vlivu na zhrubnutí zrna.

#### 3.1. Plán experimentů

Laboratorní experimenty provedené v této diplomové práci lze rozdělit do tří fází a to experimenty posuzující vliv vneseného tepla a intenzity odvodu tepla na geometrii návaru, vlastní měření teplotních cyklů v TOO a posouzení vlivu vybraných teplotních cyklů na změny velikosti zrna v TOO.

##### **Experimenty posuzující vliv vneseného tepla na geometrii návaru**

Vzhledem k tomu, že mapování rozložení teplot v TOO je poměrně složitá metoda měření, bylo nutné posoudit jak vliv měrného vneseného tepla na geometrii návaru, tak také ověřit vliv rozdílné intenzity odvodu tepla, ale i stabilitu procesu svařování metodou MAG. Hodnota měrného vneseného tepla je u obloukových metod svařování dána vzájemným poměrem hlavních procesních parametrů – proud, napětí a rychlost svařování. Rozdílné intenzity odvodu tepla od místa svařování je pak docíleno rozdílnou tloušťkou materiálu,

na němž je návar realizován. Stabilita svařování by měla být v ustálené oblasti svaru zachována, ale i toto tvrzení bylo třeba experimentálně odzkoušet.

Návrh experimentů v první fázi měl proto následující cíle:

- Stanovit vliv vneseného tepla na geometrii návaru
- Stanovit vliv intenzity odvodu tepla na geometrii návaru
- Nalezení ustálené oblasti svařování vhodné pro umístění termočlánků ve druhé fázi experimentů
- Návrh a výroba zkušebních desek pro měření teplotních cyklů
- Odzkoušení umístění, aplikace termočlánků typu K a způsob jejich připojení
- Posouzení výsledků a zvolení podmínek pro vlastní měření teplotních cyklů

### **Vlastní měření teplotních cyklů**

Výsledky a poznatky získané v první fázi experimentů pak byly aplikovány při vlastním měření teplotních cyklů pro získání dat potřebných pro popis rozložení teplot v TOO u návarů.

Experimenty měření teplotních cyklů měly následující cíle:

- Měření teplotních cyklů při minimálních a maximálních hodnotách vneseného tepla s termočlánky typu K umístěných ze spodní strany návaru i na povrchu materiálu
- Otestování termočlánků typu S, jejich zapojení ke kompenzačnímu vedení a zapojení do sběrnice.
- Měření teplotních cyklů při minimálních a maximálních hodnotách vneseného tepla s termočlánky typu K umístěných ze spodní strany návaru
- Zpracování výsledků a na jejich základě definování rozložení teplot v TOO pro rozdílné hodnoty vneseného tepla
- Definování teplotních cyklů ze stejné vzdálenosti od hranice ztavení pro různé hodnoty vneseného tepla. Posouzení jejich vlivu na zhrubnutí zrna u oceli S460MC.

### Posouzení vlivu vybraných teplotních cyklů na změny velikosti zrna v TOO

- Naprogramování a odzkoušení získaných teplotních cyklů v dilatometru DIL 805L
- Aplikace optimalizovaných teplotních cyklů na ocel S460MC
- EBSD analýza k vyhodnocení intenzity zhrubnutí zrna

#### 3.1.1. Charakteristika materiálů použitých v experimentální části

Při veškerých svařovacích experimentech realizovaných v rámci první fáze byla použita konstrukční ocel S355J2, která má téměř identické teplotně-fyzikální vlastnosti a chování jako jemnozrnná ocel S460MC a navíc je levnější a snadno dostupná. Výsledky získané z první fáze experimentů byly následně aplikovány na jemnozrnnou ocel S460MC, která byla použita při aplikaci teplotních cyklů v dilatometrických měřeních.

#### Ocel S460MC

Ocel S460MC je konstrukční, jemnozrnná, mikrolegovaná, svařitelná ocel, která se vyrábí za pomoci termomechanického válcování. Ocel je mikrolegována Ti, Nb, Al a V. Mez pevnosti se pohybuje mezi 520 – 670 MPa. Tažnost se pohybuje mezi 14 – 17%.

Číselné označení v názvu oceli definuje minimální zaručenou mez kluzu 460 MPa. Další popisná písmena v názvu oceli mají následující význam: S – označuje konstrukční ocel, M – termomechanicky válcováno a C – označuje zvláštní tváritelnost za studena. V Tab. 4, je uvedeno chemické složení oceli S460MC změřené pomocí spektrometru Bruker Q4 Tasman.

**Tab. 4 Chemické složení oceli S460MC změřené pomocí spektrometru Bruker Q4 Tasman**

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]
0,072	0,012	1,324	0,031	0,008	0,011	0,002	0,006
Cu [%]	Al [%]	Ti [%]	N [%]	Nb [%]	V [%]	W [%]	Fe [%]
0,020	0,031	0,004	0,006	0,051	0,080	0,039	zbytek

### 3.1.2. Použitá metoda svařování

Veškeré svařování proběhlo v laboratoři KSP na TU v Liberci a to za použití následujících přístrojů a zařízení:

Metoda svařování: MAG

Svařovací zařízení: Migatronik BDH 550 Puls Sync (Obr. 15)

Ochranný plyn: směsný plyn M21 (82% Ar / 18% CO<sub>2</sub>) dle ČSN EN ISO 14175

Přídavný materiál: plný drát OK Autrod 12.51 o průměru 1,2 mm

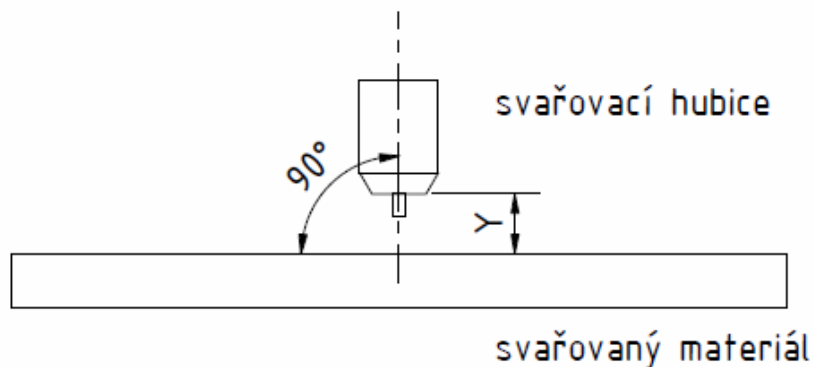
Lineární automat s plynule nastavitelnou rychlostí pohybu od 0,3 do 1,6 m.s<sup>-1</sup> (Obr. 15)



***Obr. 15 Použité svařovací zařízení a lineární automat***

Svařování probíhalo v poloze PA, kdy osa hořáku svírala se svařovaným materiálem úhel 90°, což je schematicky vyobrazeno na Obr. 16 a proces svařování probíhal v synergickém režimu. Pro monitorování skutečných parametrů ve svarové lázni byl použit software WeldMonitor s frekvencí záznamu 20 snímků za sekundu.

Vzdálenost hubice hořáku od svařovaného materiálu byla nastavena pomocí měrky na vzdálenost Y, což bylo při počátečních experimentech 15 mm a při měření teplotních cyklů byla vzdálenost snížena na 14 mm. V obou těchto případech bylo ověřeno, že dochází k bezzkratovému způsobu přenosu kovu.



*Obr. 16 Nastavení svařovací hubice vůči svařovanému materiálu*

## 3.2. Realizace první fáze experimentů

První fáze experimentů vycházela z cílů uvedených v kapitole 3.1. Pro experimenty bylo navrženo celkem 7 svarů s rozdílnými hodnotami měrného vneseného tepla. Jeho velikost byla v rozmezí od  $8 \text{ kJ.cm}^{-1}$  do  $14 \text{ kJ.cm}^{-1}$  a byla odstupňována krokem  $1 \text{ kJ.cm}^{-1}$ . Vzorec pro výpočet měrného vneseného tepla již byl uveden v teoretické části této práce.

### 3.2.1. Vliv vneseného tepla na geometrii návaru

Na geometrii svarové lázně má značný vliv především hodnota svařovacího proudu. Proto bylo rozhodnuto zachovat pro všechny experimenty stejné hodnoty proudu a napětí a rozdílné hodnoty vneseného tepla docílit pouze změnou rychlosti svařování. S klesající rychlostí roste hodnota měrného vneseného tepla. Svařovací rychlost byla však limitována také použitým vybavením, kdy na lineárním automatu lze nastavit rychlost pohybu pouze s určitou přesností. V tabulce (Tab. 5) jsou uvedeny jak nastavované hodnoty, tak také reálně dosažené hodnoty svařování, změřené systémem WeldMonitor. V hodnotách uvedených v tabulce není uvažována účinnost přenosu tepla.

*Tab. 5 Parametry zkušebních svarů pro měření vlivu vneseného tepla na geometrii návaru*

Měr. vnes. teplo [kJ.cm <sup>-1</sup> ]	Svar	Nastavené parametry		Skutečné parametry		
		Proud [A]	Rychlost svařování [cm.min <sup>-1</sup> ]	Měr. vnes. teplo [kJ.cm <sup>-1</sup> ]	Napětí [V]	Proud [A]
14	38-12	300	38	13,81	28,6	305,8
13	40-12	300	40	13,11	28,6	305,6
12	44-12	300	44	11,90	28,8	303



<b>11</b>	48-12	300	48	10,91	28,8	303
<b>10</b>	52-12	300	52	10,12	28,6	306,7
<b>9</b>	58-12	300	58	9,06	28,6	306,1
<b>8</b>	66-12	300	66	8,06	28,2	314,5

### Vzorky pro zkušební experimenty

Pro počáteční zkušební experimenty byly vybrány ploché tyče z konstrukční oceli S355J2 o šířce 120 mm a tloušťkách 8 mm, 12 mm a 15 mm. Z plochých tyčí byly nařezány vzorky o délce 200 mm, za pomoci pásové pily Bomar Ergonomic 275.230 DG. V místě budoucích svarů byl materiál důkladně očištěn a zbaven mastnoty.

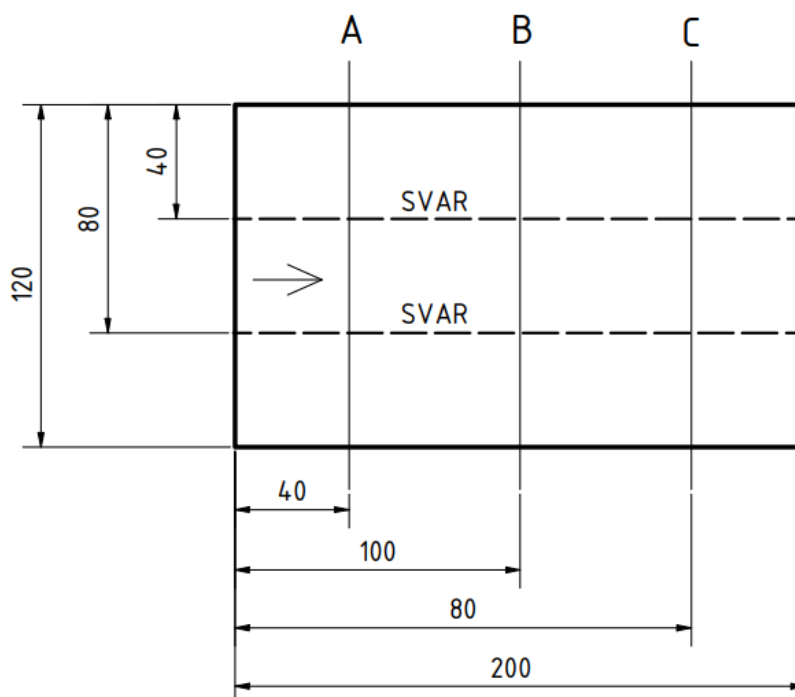
### Průběh zkušebních experimentů

Na každý připravený vzorek materiálu byly provedeny dva svary a to vždy tak, že se vzorek nechal po prvním svaru vychladnout na teplotu okolí. Zároveň byly oba svary od sebe dostatečně vzdáleny tak, aby se jednotlivé svarové housenky nemohly ovlivnit žádným způsobem. Oba svary byly také svařovány tak, aby měly začátek a konec na stejné straně (Obr. 17) a to proto, aby byly metalografické výbrusy dělány ze stejného místa u všech svarů a byly tak získány relevantní výsledky.



*Obr. 17 Vzorek s navařenými svary*

U takto navařených svarů bylo třeba porovnat základní geometrické rozměry a celkovou plochu návaru tak, aby mohla být potvrzena oblast ustáleného svařování a tedy i rovnoměrnost svarové housenky. Tato informace je důležitá pro druhou fázi experimentů, ve které budou termočlánky umísťovány v přesně definovaných vzdálenostech od předpokládané hranice ztavení návaru. Při svařování se předpokládá, že ustálená oblast je u svarů již ve vzdálenosti 30 mm od začátku a konce svaru. Proto byly u všech sedmi návarů realizovaných s rozdílnou hodnotou vneseného tepla udělány metalografické výbrusy v místech podle Obr. 18.

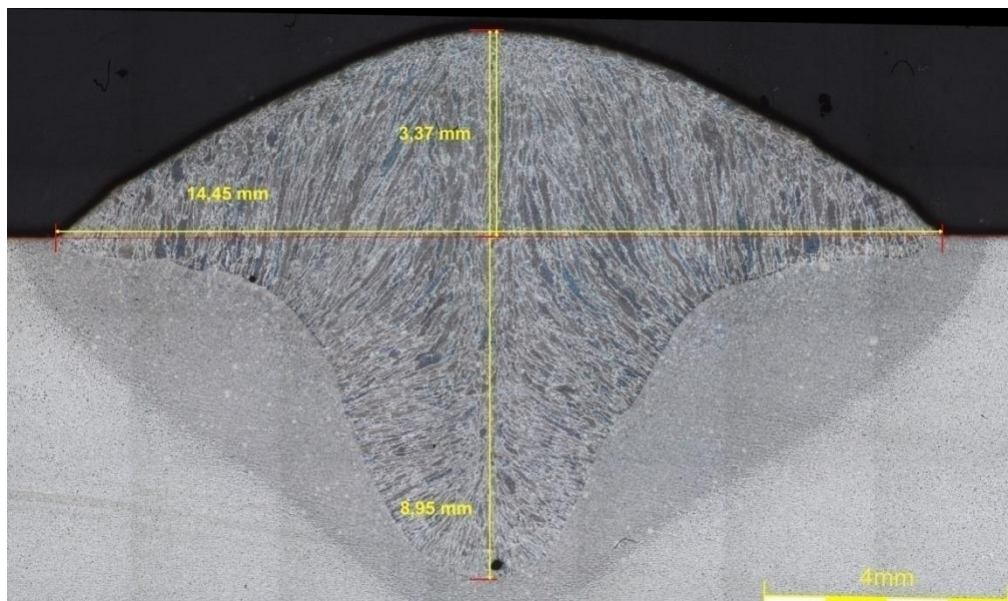


**Obr. 18 Rozmístění svarů a místa odběru metalografických výbrusů na materiálu**

Svar byl v definovaných místech rozřezán za pomoci pásové pily na vzorečky velikostně vhodné pro metalografický výbrus. Vzorečky byly následně zality do pryskyřice Dentacryl a po vytvrdnutí a metalografické přípravě byly naleptány pomocí leptadla 3% Nital (3% roztok  $\text{HNO}_3$  v lihu), které zajistí viditelnost vlastního svaru a tepelně ovlivněných oblastí. Mikroskopické vyhodnocení, tedy nasnímání a rozměrová analýza připravených výbrusů, bylo provedeno na mikroskopu Neophot 21 v softwaru NIS Elements AR 3.2.

Na jednotlivých metalografických výbrusech byly měřeny parametry ve shodě s Obr. 19. Jednalo se o šířku svaru, výšku svaru a převýšení. Z těchto hodnot byla následně odečtena

ještě hloubka průvaru. Tímto způsobem byly vyhodnoceny veškeré metalografické výbrusy v této diplomové práci.



**Obr. 19** Příklad rozměrové analýzy svaru 38-12C

Dále bylo nutné na všech svarech vyhodnotit ještě plochu svaru (Obr. 20), aby bylo zjištěno, zda je teplo využívané k tavení materiálu využito rovnoměrně a zda je zachován konstantní průřez v celé délce svarové housenky. K tomuto vyhodnocení byl opět použit program NIS Elements AR 3.2.



**Obr. 20** Vyhodnocení plochy svaru 38-12C

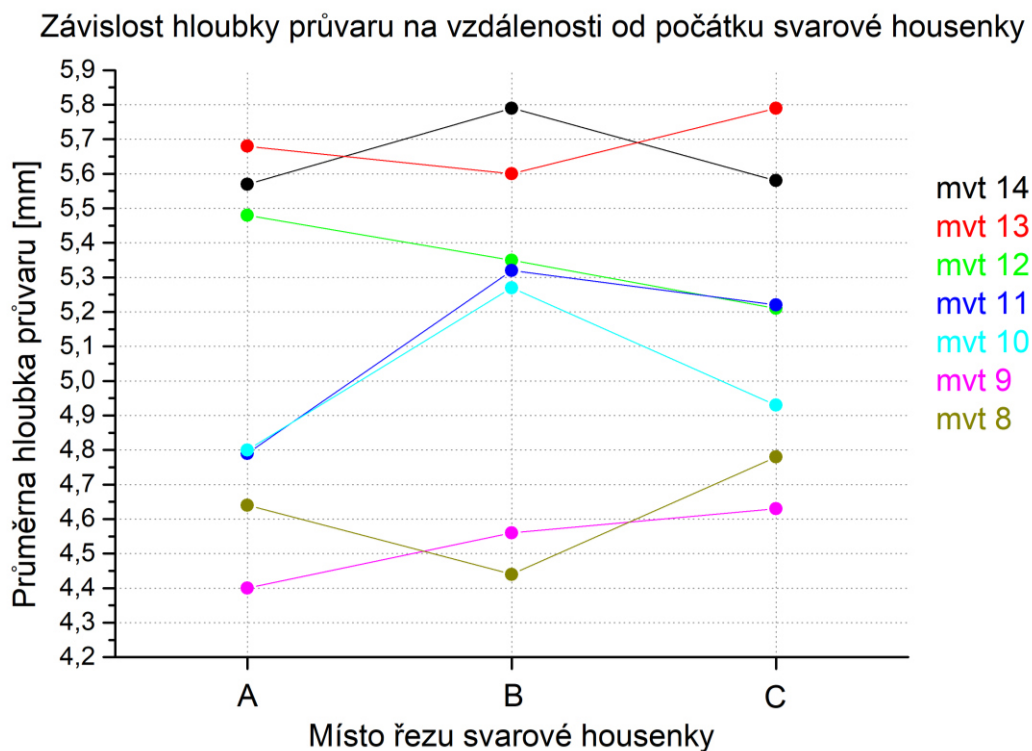
K nalezení a potvrzení ustálené oblasti svařování bylo provedeno celkově 21 metalografických výbrusů. Výsledky geometrického vyhodnocení jednotlivých svarů jsou uvedeny v Tab. 6. Výše popsany typ experimentů, tedy 3 výbrusy na každém návaru, byl realizován pouze na materiálu o tloušťce 12 mm. Získané poznatky pak byly aplikovány i na ostatní tloušťky materiálu.

**Tab. 6 Parametrické vyhodnocení svarů při měření geometrie návaru**

Vnes. tep. [kJ.cm <sup>-1</sup> ]	Svar	Plocha svaru [mm <sup>2</sup> ]	Šířka svaru [mm]	Výška svaru [mm]	Převýšení [mm]	Průvar [mm]
<b>14</b>	38-12A	63,79	13,48	8,9	3,05	5,85
	38-12B	62,66	13,79	9,11	3,32	5,79
	38-12C	59,85	14,45	8,95	3,35	5,60
<b>13</b>	40-12A	58,26	12,52	9,33	3,65	5,68
	40-12B	59,44	12,51	9,23	3,63	5,6
	40-12C	59,95	12	9,33	3,54	5,79
<b>12</b>	44-12A	59,94	12,39	9,08	3,6	5,48
	44-12B	55,92	12,18	8,64	3,29	5,35
	44-12C	57,05	10,93	8,92	3,71	5,21
<b>11</b>	48-12A	52,47	12,19	8,06	3,27	4,79
	48-12B	52,94	11,15	8,68	3,36	5,32
	48-12C	52,04	10,87	8,43	3,21	5,22
<b>10</b>	52-12A	47,18	10,25	8	3,2	4,8
	52-12B	50,88	10,42	8,66	3,39	5,27
	52-12C	51,33	10,79	8,56	3,63	4,93
<b>9</b>	58-12A	40,06	9,89	7,47	3,07	4,4
	58-12B	43,78	10,2	7,66	3,1	4,56
	58-12C	43,11	9,78	7,73	3,1	4,63
<b>8</b>	66-12A	39,59	11,05	7,47	2,83	4,64
	66-12B	40,91	10,36	7,38	2,94	4,44
	66-12C	40,89	10,12	7,93	3,15	4,78

Nejdůležitějším parametrem, z hlediska následného umístění termočlánků, byla hloubka průvaru. Jak vyplývá z Obr. 21, hloubka průvaru není po celé délce svarové housenky konstantní a mění se i podle hodnoty vneseného tepla na jednotku délky svaru.

U žádného z návarů nepřesáhla směrodatná odchylka průměrné hloubky protavení hodnotu  $\pm 0,23$  mm, i přes to je však toto zjištění poměrně problematické z pohledu následných měření, kdy se ukázalo jako velmi obtížné trefit umístění termočlásku v dostatečné blízkosti hranice ztavení. Z tohoto faktu plynuly i poměrně rozsáhlé změny v provedení dalších experimentů, které budou vysvětleny v následujících kapitolách.



**Obr. 21** Závislost hloubky průvaru na vzdálenosti od počátku svarové

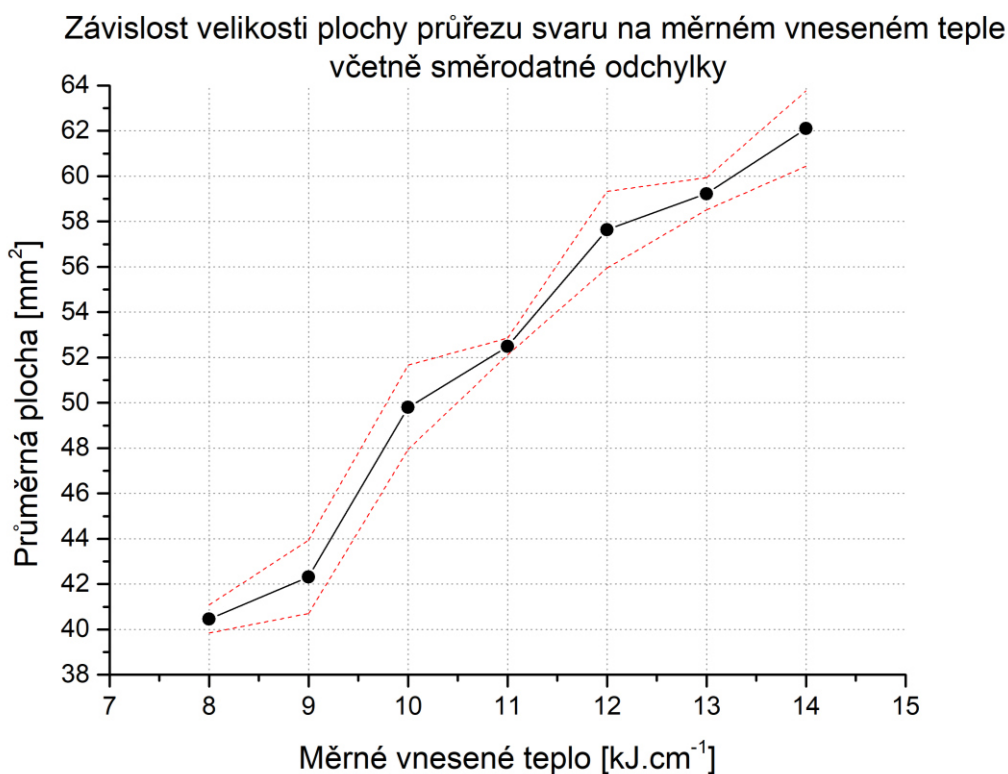
Z ostatních parametrů byly vypočítány průměrné hodnoty vždy ze všech třech (A, B, C) metalografických výbrusů na jedné svarové housence. Tyto hodnoty jsou včetně směrodatných odchylek uvedeny v Tab. 7.

**Tab. 7** Průměrné hodnoty vybraných parametrů z měření geometrie návaru se směr. odchylkami

Vnes. tep. [kJ.cm <sup>-1</sup> ]	Svar	Prům. plocha svaru [mm <sup>2</sup> ]	Prům. šířka svaru [mm]	Prům. průvar [mm]
14	38-12	62,10 ± 1,66	13,91 ± 0,40	5,75 ± 0,11
13	40-12	59,22 ± 0,71	12,34 ± 0,24	5,69 ± 0,08
12	44-12	57,64 ± 1,69	11,83 ± 0,64	5,35 ± 0,11
11	48-12	52,48 ± 0,37	11,40 ± 0,57	5,11 ± 0,23
10	52-12	49,80 ± 1,86	10,49 ± 0,23	5,00 ± 0,20
9	58-12	42,32 ± 1,62	9,96 ± 0,18	4,53 ± 0,10
8	66-12	40,46 ± 0,62	10,51 ± 0,39	4,62 ± 0,14

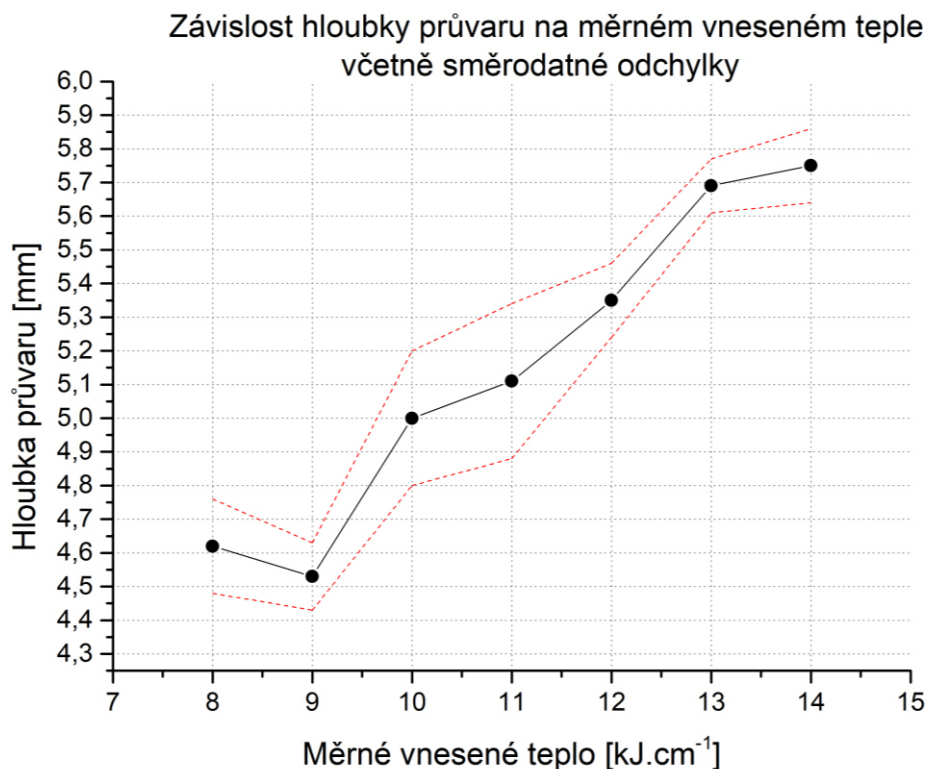


Z hodnot uvedených v tabulce 7 byly pro lepší ilustraci vytvořeny grafy a to: graf závislosti průměrné plochy svaru na hodnotě vneseného tepla (Obr. 22) a graf závislosti průměrné hloubky průvaru na hodnotě vneseného tepla (Obr. 23).



**Obr. 22 Závislost velikosti plochy průřezu svaru na měrném vneseném teple při měření geometrie návaru**

Z Obr. 22 je zřejmé, že se vrůstajícím měrným vneseným teplem roste plocha svaru, což je očekávaný výsledek. Do místa svaru je dodána vyšší energie a materiál má delší čas na protavení se do větší hloubky. Tím pádem je do místa svařování dodáno i větší množství přídavného materiálu, takže roste i šířka a převýšení svaru. Tento fakt potvrzuje i závislost hloubky protavení na hodnotě měrného vneseného tepla ukázána na Obr. 23.



*Obr. 23 Závislost hloubky průvaru na měrném vneseném teple při měření geometrie návaru*

### 3.2.2. Vliv intenzity odvodu tepla na geometrii návaru

K docílení rozdílné intenzity odvodu tepla došlo za pomoci změny tloušťky materiálu, na kterém byl dělán návar. Byly zvoleny tloušťky materiálu 8, 12 a 15 mm, protože u tloušťky nižší než 8 mm by při zvolených svařovacích parametrech docházelo již k protavení skrz materiál, což se také stalo u jednoho zkušební vzorku. U tlouštěk materiálu nad 15 mm se již intenzita odvodu tepla vzhledem k použitým procesním parametrům výrazněji nemění, a proto nemělo smysl používat větší tloušťky. Nastavované i reálně změřené procesní parametry pro návary na materiálu tloušťky 8, 12 a 15 mm jsou uvedeny v Tab. 8. Jako parametry pro tloušťku materiálu 12 mm byly využity svary z předchozího měření. Dále bylo na základě výsledků s návary na materiálu tloušťky 12 mm rozhodnuto, že vliv intenzity odvodu tepla bude hodnocen pouze pro hodnoty měrného vneseného tepla 8, 10, 12 a 14  $\text{kJ.cm}^{-1}$ .

**Tab. 8 Parametrické vyhodnocení svarů při měření intenzity odvodu tepla**

Tloušťka svař. materiálu [mm]	Svar	Nastavené parametry		Skutečné parametry		
		Proud [A]	Rychlost svařování [cm.min <sup>-1</sup> ]	Proud [A]	Napětí [V]	Měr. vnes. teplo [kJ.cm <sup>-1</sup> ]
15	38-15B	300	38	307	28,6	13,863
15	44-15B	300	44	309,6	28,5	12,032
15	52-15B	300	52	316,1	28,2	10,285
15	66-15B	300	66	317,8	28,1	8,118
12	38-12B	300	38	305,8	28,6	13,809
12	44-12B	300	44	303	28,8	11,900
12	52-12B	300	52	306,7	28,6	10,121
12	66-12B	300	66	314,5	28,2	8,063
8	38-8B	300	38	311	28,5	13,995
8	44-8B	300	44	315,7	28,2	12,140
8	52-8B	300	52	315,8	28,2	10,276
8	66-8B	300	66	319,7	27,9	8,109

Geometrické vyhodnocení získaných návarů bylo provedeno stejným způsobem, jaký byl popsán v kapitole 3.2.1. V tomto případě ale nebyly dělány výbrusy ze začátku, prostředku a konce svaru, ale metalografický výbrus byl dělán pouze uprostřed svarové housenky tj. na pozici B na Obr. 18. Výsledky geometrického vyhodnocení jednotlivých svarů jsou uvedeny v tabulce (Tab. 9).

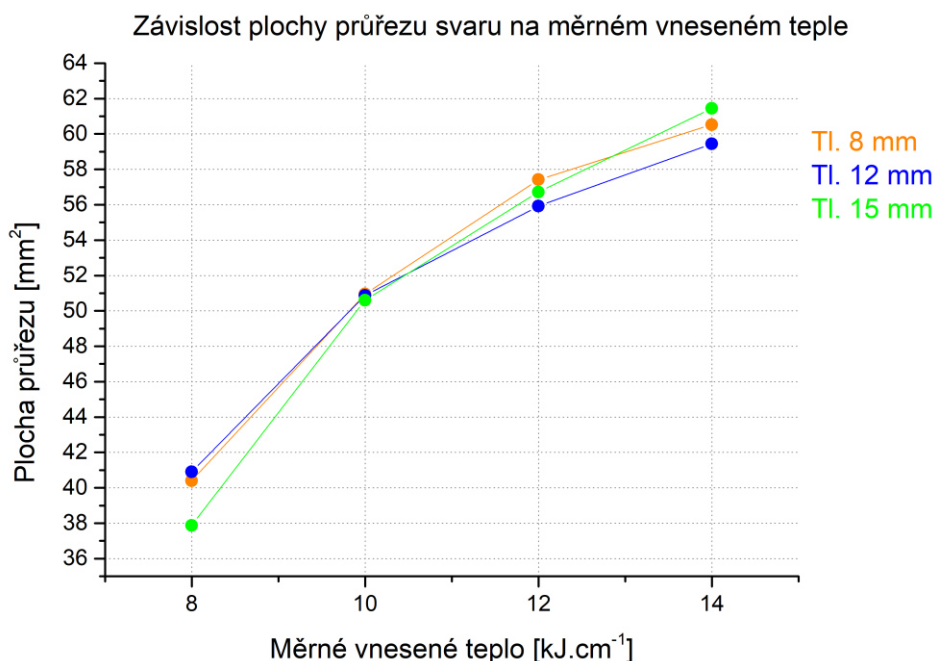
**Tab. 9 Vyhodnocení rozměrů svarů při měření intenzity odvodu tepla**

Tloušťka [mm]	Svar	Plocha svaru [mm <sup>2</sup> ]	Šířka svaru [mm]	Výška svaru [mm]	Převýšení [mm]	Průvar [mm]
15	38-15B	61,45	13,51	8,67	3,01	5,66
	44-15B	56,72	13,71	8,3	2,93	5,37
	52-15B	50,61	12,34	8,61	3,04	5,57
	66-15B	37,88	9,34	7,55	2,75	4,8
12	38-12B	59,44	13,79	9,11	3,32	5,79
	44-12B	55,92	12,18	8,64	3,29	5,35
	52-12B	50,88	10,42	8,66	3,39	5,27
	66-12B	40,91	10,36	7,38	2,94	4,44



8	38-8B	60,52	14,3	8,15	3,12	5,03
	44-8B	57,42	13,63	8,47	3,1	5,37
	52-8B	50,95	11,69	8,61	3,24	5,37
	66-8B	40,4	9,24	7,99	3,17	4,82

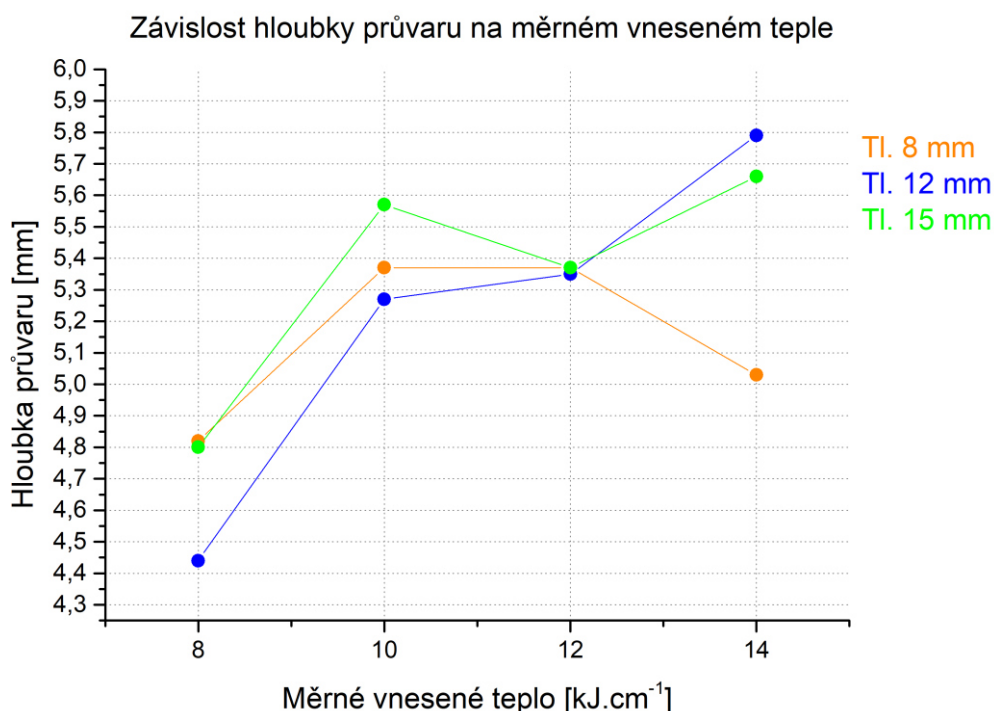
Z údajů uvedených v Tab. 9 byly pro lepší ilustraci vytvořeny grafy. Na Obr. 24 lze vidět závislost velikosti plochy průřezu svaru na měrném vneseném teple. Opět bylo potvrzeno, že s rostoucím měrným teplem roste velikost plochy průřezu svaru z důvodů, které jsou popsány v předchozí kapitole. Co však bylo podstatné při tomto měření je to, zda při různé intenzitě odvodu tepla (rozdílné tloušťce materiálu) dochází k rozdílným změnám v průřezu svarové plochy. Je vidět, že tomu tak není, protože všechny tři křivky mají podobný trend a pouze malé odchylky, které jsou však spíše způsobeny vlastním procesem svařování.



**Obr. 24** Závislost velikosti plochy průřezu svaru na měrném vneseném teple při měření intenzity odvodu tepla

V grafu na Obr. 25 je zobrazena závislost hloubky průvaru na měrném vneseném teple pro jednotlivé tloušťky materiálu. Jak je z obrázku zřejmé, hodnoty průvaru se pro různé intenzity odvodu tepla (různé tloušťky materiálu) mění v řádu desetin milimetru, při porovnání jednotlivých hodnot měrného vneseného tepla. Výraznější rozdíl oproti

očekávání byl pouze u svaru s  $Q = 14 \text{ kJ.cm}^{-1}$  na tloušťce materiálu 8 mm. Zde byl předpokládán zvýšený průvar do základního materiálu, což by se dalo předpokládat i podle celkové plochy svaru. V tomto případě však namísto zvětšení průvaru došlo k výraznějšímu nárůstu šířky svaru. V praxi to znamená, že se nedá přesně odhadnout, kde se bude nacházet hranice ztavení a bylo tomu nutné přizpůsobit i následující experimenty, kdy musel být použit větší počet termočlánků umístěných v různé vzdálenosti od předpokládané hranice ztavení a navíc musela být u každého termočlánku metalografickým výbrusem potvrzena vzdálenost od hranice ztavení.



*Obr. 25 Závislost hloubky průvaru na měrném vneseném teple při měření intenzity odvodu tepla*

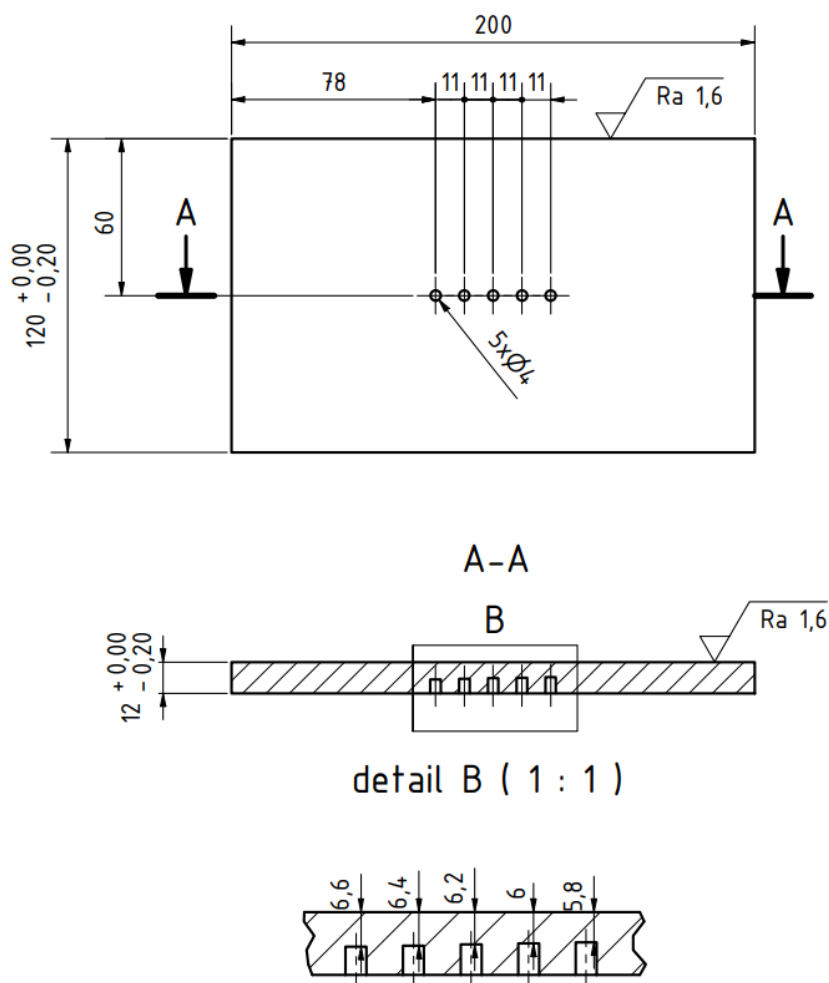
### 3.3. Měření teplotních cyklů

Měření teplotních cyklů bylo realizováno na materiálu o tloušťce 12 mm, protože vykazoval nejstabilnější chování při svařování s nejmenšími odchylkami v geometrii svarové lázně. Navíc se jednalo o tloušťku materiálu, na níž bylo provedeno nejvíce geometrických vyhodnocení. To bylo důležité především pro návrh zkušební desky s termočlánky umístěnými v přesně definovaných místech vzorku. Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, předpokládalo se umístění termočlánků do otvorů vyfrézovaných a umístěných do různých vzdáleností od předpokládané hranice ztavení v místě maximálního průvaru návaru.

### 3.3.1. Příprava vzorku pro měření teplotních cyklů

Pro měření teplotních cyklů byly vybrány hodnoty vneseného tepla  $8 \text{ kJ.cm}^{-1}$  a  $14 \text{ kJ.cm}^{-1}$ . Jedná se o krajní hodnoty, které byly použity při zkušebních měřeních a je tudíž předpoklad, že zde budou výraznější rozdíly v zaznamenaných teplotních cyklech.

Pro měření teplotních cyklů byly pro každou hodnotu vneseného tepla vyrobeny dvě speciálně navržené návarové desky, které se vzájemně lišily hloubkou vyfrézovaných otvorů pro připojení termočlánků. Na Obr. 26 je pro ilustraci zobrazen výkres zkušební desky pro návar s hodnotou měrného vneseného tepla  $14 \text{ kJ.cm}^{-1}$ , označené jako varianta A. Tato varianta obsahovala otvory vyfrézované do hloubky 0,0; 0,2; 0,4; 0,6 a 0,8 mm od předpokládané hranice ztavení v místě maximálního průvaru návaru. Varianta B poté obsahovala otvory vyfrézované do hloubky 1,0; 1,2; 1,4; 1,6 a 1,8 mm od předpokládané hranice ztavení opět v místě maximálního průvaru návaru. Stejným způsobem byly vytvořeny zkušební desky pro návar s hodnotou měrného vneseného tepla  $8 \text{ kJ.cm}^{-1}$ .



**Obr. 26** Výkres pro výrobu vzorku  $14\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$  \_A pro měření teplotních cyklů

Jak si lze povšimnout, u vyfrézovaných otvorů není zakótovaná jejich hloubka, ale tloušťka stěny nad otvorem. Tento parametr je totiž nejpodstatnější, jedná se o hloubku, do které se může svar provařit, než narazí na hranici otvoru s přivařeným termočlánkem. Tloušťky stěn použitých na jednotlivých deskách pro návar zobrazuje Tab. 10.

Nejmenší tloušťka stěny byla zvolena ze střední hodnoty průměrné hloubky průvaru při zkušebních měřeních. Menší hodnotu nemá smysl volit, protože termočlánek by se dostal nad hranici ztavení, tedy přímo do svarové lázně a došlo by k jeho destrukci kvůli příliš vysoké teplotě.

**Tab. 10 Tloušťky stěn na jednotlivých vzorcích pro měření teplotních cyklů**

Vzorek	Tloušťka stěny nad dírou [mm]				
<b>8kJ.cm<sup>-1</sup>_A</b>	5,4	5,2	5,0	4,8	4,6
<b>8kJ.cm<sup>-1</sup>_B</b>	6,4	6,2	6,0	5,8	5,6
<b>14kJ.cm<sup>-1</sup>_A</b>	6,6	6,4	6,2	6,0	5,8
<b>14kJ.cm<sup>-1</sup>_B</b>	7,6	7,4	7,2	7,0	6,8

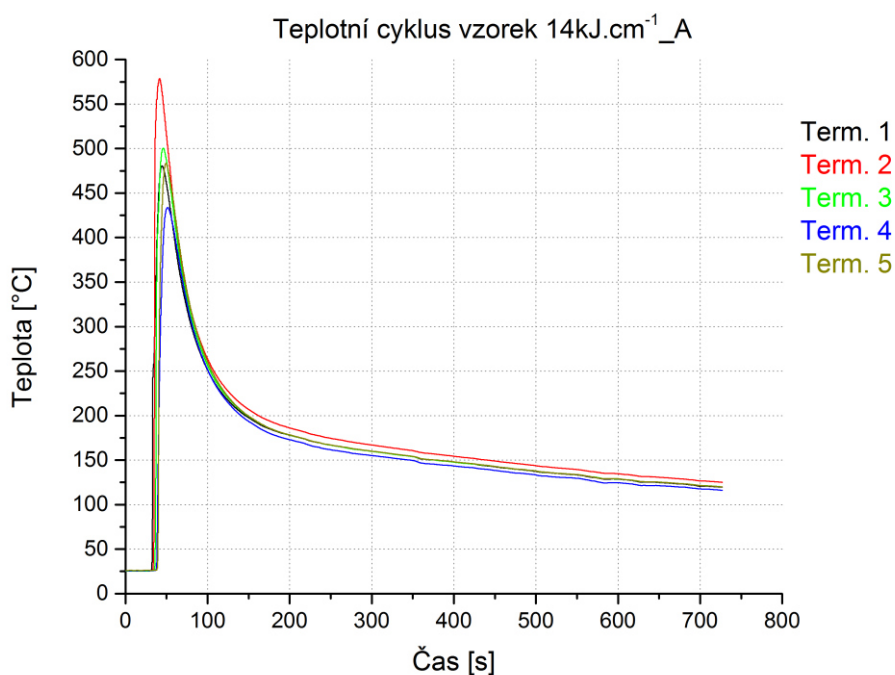
U takto připravených desek pro návary bylo nutno vyřešit problém připojení vlastních termočlánků. Nakonec byly zvoleny termočlánky typu K, které jsou na KSP využívány pro podobné experimenty měření teploty a které jsou schopny měřit teplotu do cca 1300 °C. Výhodou je i jejich průměr 0,5 mm, který lze dostupnými zařízeními kondenzátorově přivařit na dno otvorů. Termočlánekové vedení bylo nastříháno na 1,5 metru dlouhé termočlánky, kdy u tohoto typu termočlánků nebylo použito kompenzační vedení, jak z důvodu dobré manipulace díky většímu průměru vodičů, tak také proto, že cena těchto termočlánků není vysoká.

Při kondenzátorovém svařování se vyskytl problém, že se termočlánek při manipulaci přivařil na stěnu otvoru. Aby tomu bylo zamezeno, byl uříznut kus plastového brčka, které se vložilo do otvoru jako izolace a znemožnilo tak přivaření jinak, než na dno otvoru. I přes to je místo spoje termočlánku s materiálem poměrně náchylné na poškození. Proto bylo nutné eliminovat jakékoliv síly působící na termočlánek a také umožnit snadnější manipulaci při vkládání vzorku do pojezdového automatu. Proto byla na každý vzorek přivařena ještě pomocná konstrukce s ohnuté kulatiny o průměru 6 mm, jež je zobrazena na Obr. 27, ke které byl termočlánek přidělán za pomoci elektrická pásy, což umožnilo bezproblémovou manipulaci se vzorkem.



**Obr. 27 Vzorek  $14\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}_B$  s pomocnou konstrukcí a přivařenými termočlánky v otvorech**

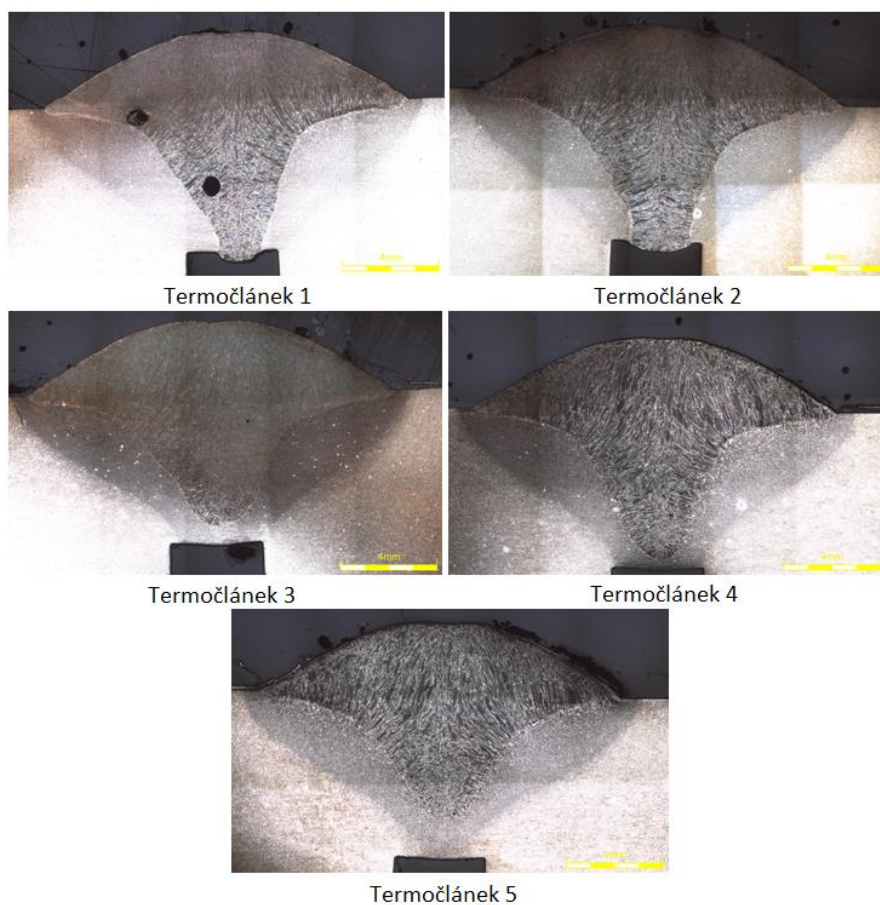
Takto připravený vzorek byl pomocí upínky připevněn k lineárnímu pojezdovému automatu (Obr. 31) a následně byl proveden návar s parametry odpovídajícími určené hodnotě měrného vneseného tepla. Po svaření návaru byl vyhodnocen teplotní cyklus změřený v místech jednotlivých termočlánků. Teplotní cyklus z prvního měření vzorku  $14\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}_A$  je ukázán na Obr. 28.



**Obr. 28 Naměřený teplotní cyklus na vzorku  $14\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}_A$**

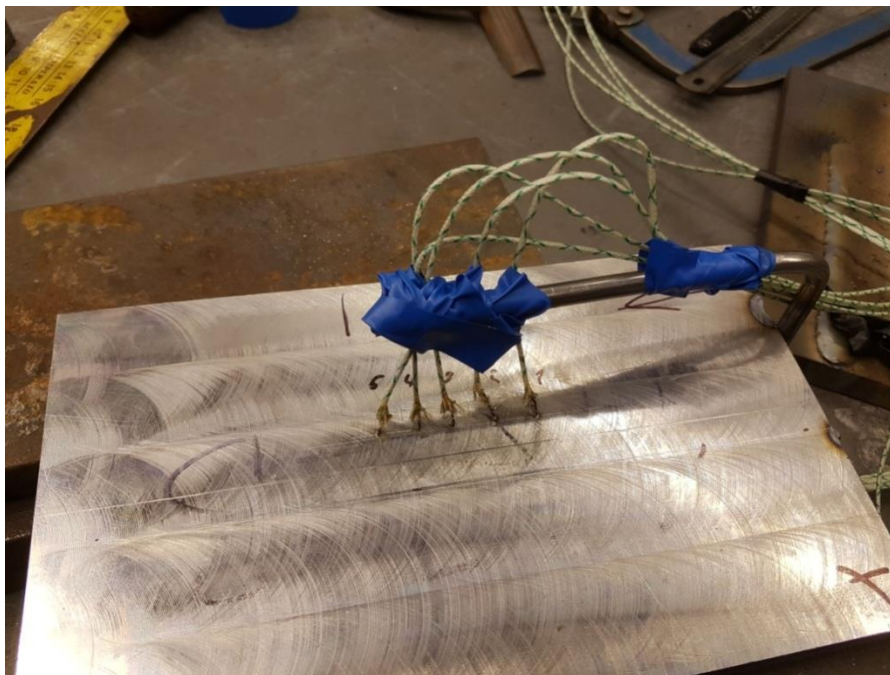
Na první pohled bylo zřejmé, že se někde stala chyba, protože nejvyšší naměřená teplota byla okolo 560 °C. Bylo několik možností, kde mohl nastat problém. Nejprve bylo potřeba potvrdit, že se termočlánky nacházejí v předpokládaných vzdálenostech od hranice ztavení tak, jak bylo zjištěno při počátečních experimentech. Proto byl v místě každého termočlánku udělán metalografický výbrus.

Z metalografických výbrusů (Obr. 29) je patrné, že hranice ztavení je přesně v místech, kde byla předpokládána a že lze tedy používat hodnoty ze zkušebních měření. Je však také jasné, že chybu je potřeba hledat jinde, protože na hranici ztavení je teplota tavení daného materiálu rozhodně vyšší než 560 °C. Navíc v otvorech u prvních dvou termočlánků došlo k provaření návaru až do otvoru a tedy k destrukci termočlánku typu K, který nevydrží teplotu svarové lázně. Bylo tedy rozhodnuto přivařit na návarovou desku se vzorkem B navíc dalších 5 termočlánků, umístěných na povrchu desky, v těsné blízkosti předpokládaného okraje svarové housenky. Termočlánky byly od této hranice opět odstupňovány krokem 0,2 mm, aby se zvýšila šance naměření použitelných dat. Na Obr. 30 jsou zobrazeny takto přivařené termočlánky na vzorku 14kJ.cm<sup>-1</sup>\_B.



**Obr. 29 Metalografické výbrusy v místech přivaření termočlánku na vzorku 14kJ.cm<sup>-1</sup>\_A**





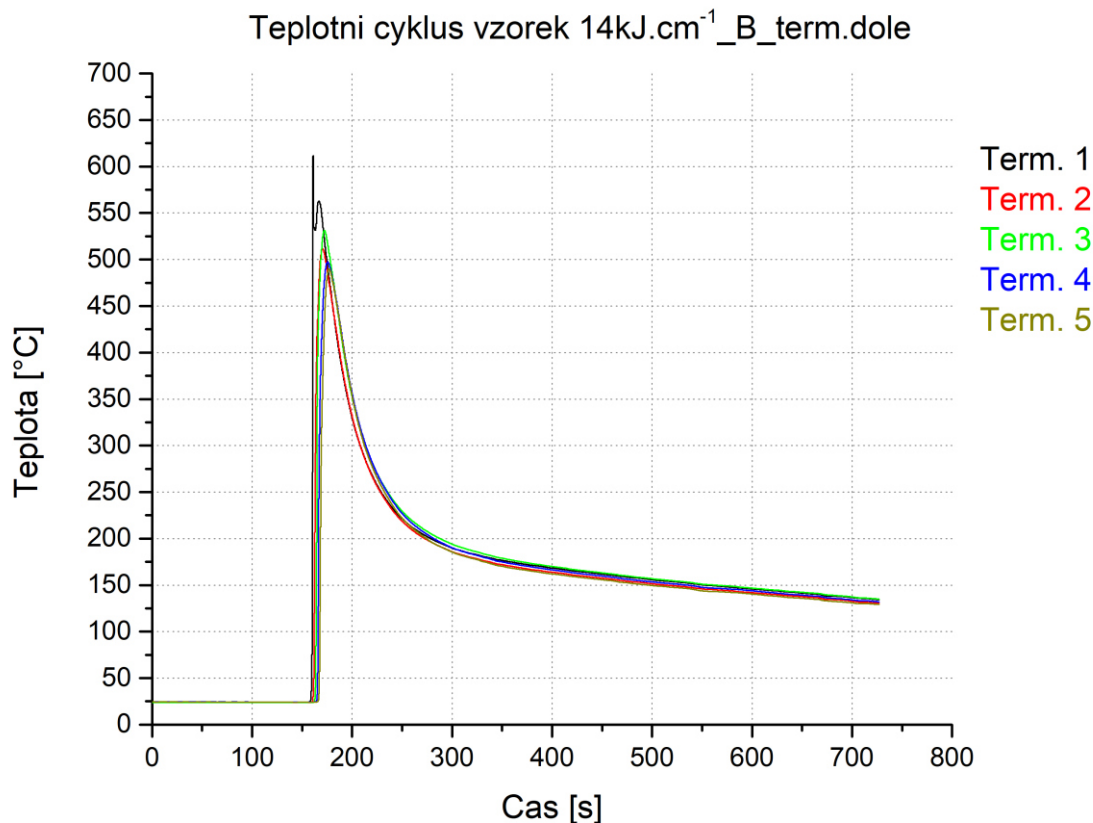
***Obr. 30 Přivařené termočlánky na povrchu materiálu na vzorku  $14\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}_B$***

Vzorek s termočlánky umístěnými ve spodních otvorech i na povrchu desky byl upnut do přípravku lineárního automatu a byl proveden návar. Je nutno podotknout, že manipulace s takto osazenou deskou, na které se nachází 10 termočlánků, které jsou navíc zapojeny do sběrnice, je poměrně složitá a může se stát, že některý z termočlánků při manipulaci odpadne, byť byla udělána všechna opatření, aby se tak nestalo. Upnutý vzorek je ukázán na Obr. 31.



***Obr. 31 Vzorek  $14\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}_B$  s 10 termočlánky upnutý na posuvném svářecím stole***

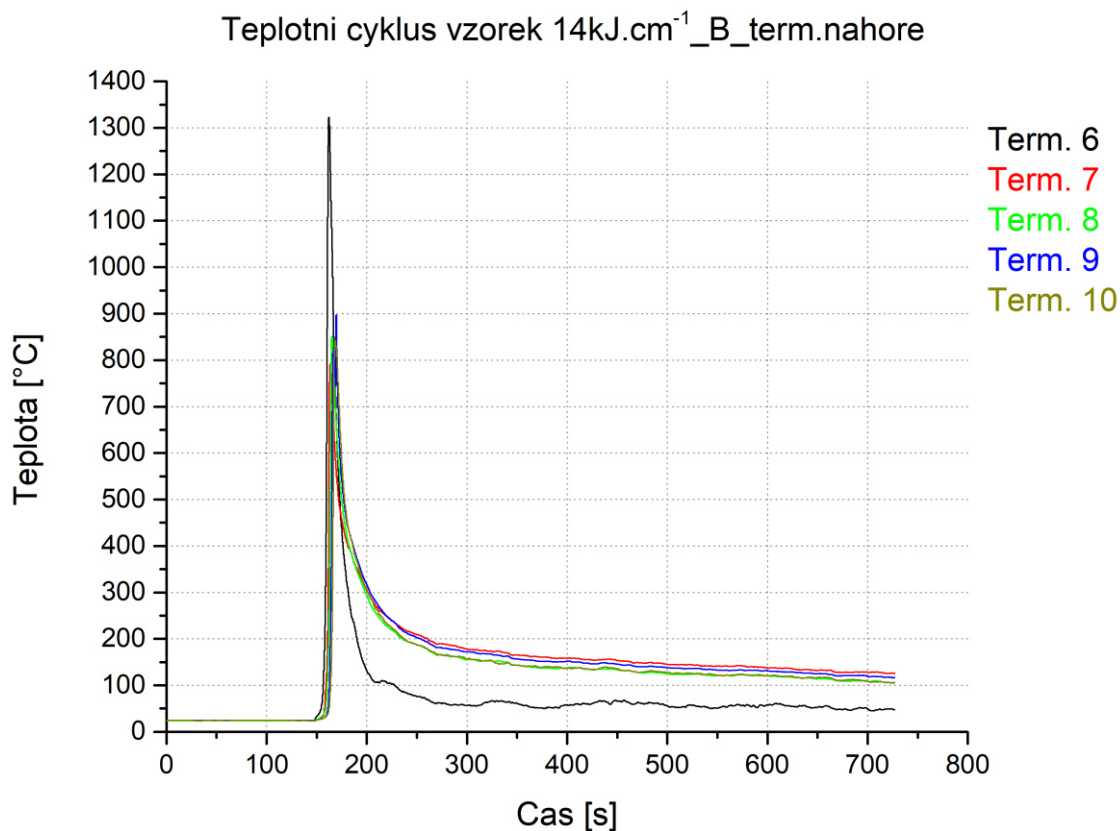
Na vzorku  $14 \text{ kJ.cm}^{-1}_B$ , jsou již otvory pro termočlánky méně hluboké, jak je uvedeno v tabulce (Tab. 10), proto by nemělo dojít k provaření až dovnitř otvoru. Teplotní cyklus změřený pomocí termočlánku v otvorech zobrazuje Obr. 32.



**Obr. 32 Naměřený teplotní cyklus na vzorku  $14 \text{ kJ.cm}^{-1}_B$  pomocí termočlánků v otvorech**

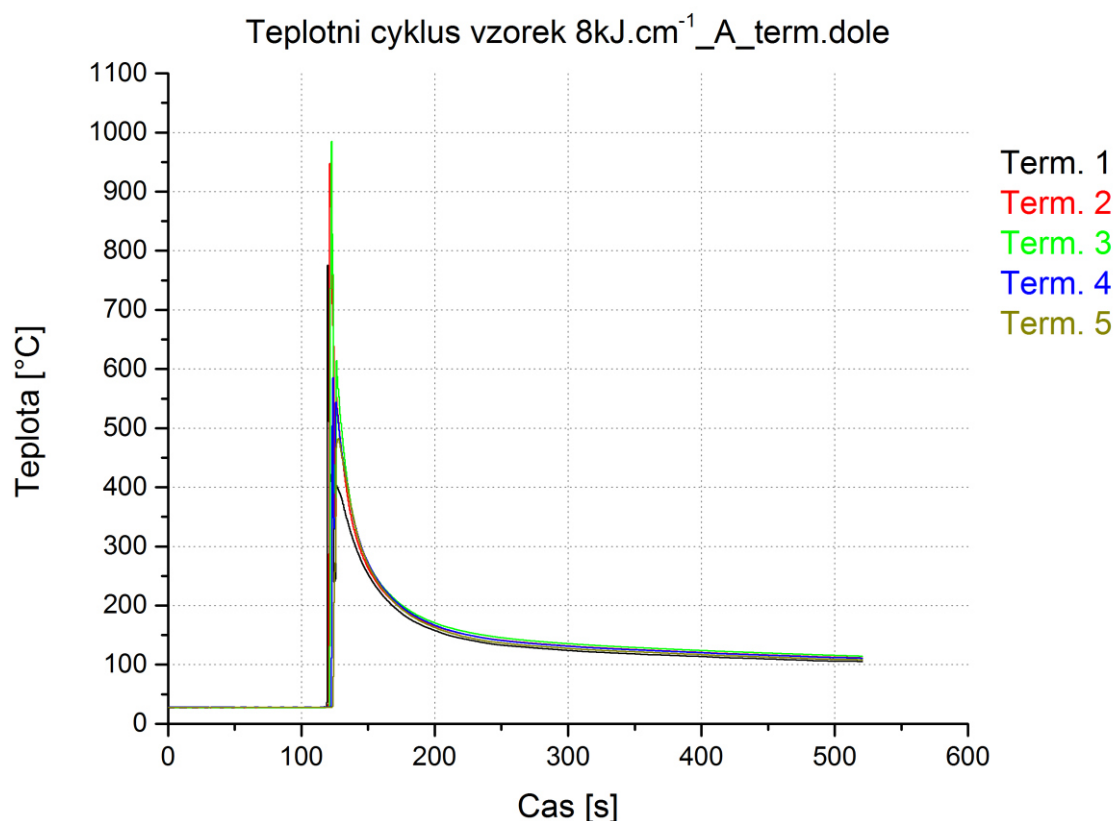
Jak je vidět, naměřená maximální teplota je sice vyšší, ale stále nedošlo k vyřešení problému, že se nedařilo zachytit vysoké teploty, které se nacházejí okolo hranici ztavení. Termočlánky umístěné na povrchu materiálu naměřily teplotní cykly zobrazené na Obr. 33, zde je vidět, že termočlánek číslo 6 naměřil maximální teplotu  $1321,8^\circ\text{C}$ , což se zdá být v pořádku. Bohužel je také vidět, že došlo k jeho destrukci vlivem vysoké teploty, což je vidět na ochlazovací části naměřeného teplotního cyklu, kdy chladne podstatně rychleji než zbylé termočlánky, protože se v průběhu svařování oddělil od materiálu.





**Obr. 33** Naměřený teplotní cyklus na vzorku 14 kJ.cm<sup>-1</sup>\_B pomocí termočlánků na povrchu

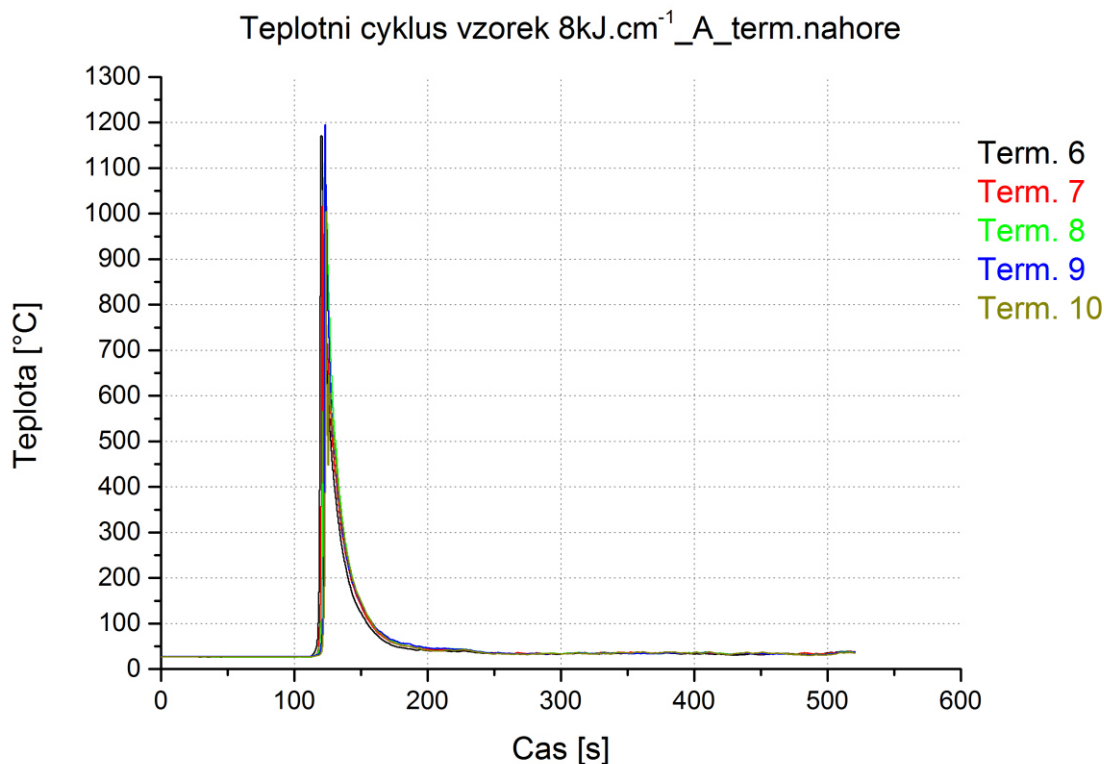
Podobné měření bylo zopakováno i na vzorku 8 kJ.cm<sup>-1</sup>\_A, kde bylo opět použito 10 termočlánků, které byly umístěny do stejných pozic jako na vzorcích s hodnotou měrného vneseného tepla 14 kJ.cm<sup>-1</sup>. Samozřejmě tím, že se snížilo měrné vnesené teplo, tak se změnily i rozměry svaru, jednotlivé potřebné parametry byly tedy opět získány ze zkušebních měření. Jediný rozdíl byl v tom, že termočlánky na povrchu byly dány do jedné řady, nebyly tedy odstupňovány s krokem 0,2 mm.



**Obr. 34** Naměřený teplotní cyklus na vzorku  $8\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}\text{A}$  pomocí termočlánků v otvorech

U termočlánků umístěných ze spodní desky v otvorech došlo k průvaru skrz u otvorů 1 - 4. Tím pádem teplota v těchto místech přesáhla teplotu, kterou vydrží kondenzátorově přivařený termočlánek typu K.

U termočlánků přidělaných na povrchu desky došlo k upálení všech 5 termočlánků od zkoumaného materiálu vlivem toho, že byly zalité svarovou lázní. Z toho lze usuzovat, že není vhodné dávat termočlánky do jedné řady bez odstupňování, protože pokud se nepovede přesně určit hranice ztavení a termočlánky jsou blíže, je nutné zopakovat celý experiment. Toto oddělení je vidět i na Obr. 35, kde je zřejmá velmi prudká ochlazovací část teplotního cyklu, která je způsobena chladnutím termočlánků na vzduchu po oddělení od zkoumaného materiálu.



**Obr. 35 Naměřený teplotní cyklus na vzorku  $8\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}\text{ _A}$  pomocí termočlánků na povrchu**

Z výše uvedených výsledků začalo být zřejmé, že co se týče umístění termočlánku, jejich kondenzátorového přivaření, zvolených parametrů svařování a vlastního provedení svaru je vše v pořádku a že je tedy problém potřeba hledat jinde. Nakonec byl problém nalezen v hardwarovém propojení sběrnice a záznamového zařízení a neschopnosti software zpracovat velmi rychlé děje při frekvenci záznamu 25 snímaných hodnot za sekundu. Bohužel se však ani přes snahu o přeprogramování softwaru nepodařilo výsledek zlepšit. Při optimalizačních testech však bylo zjištěno, že snížením na 10 snímaných hodnot za sekundu dojde k získání lepších výsledků, protože data se dokáží zapisovat rychleji do paměti. Proto bylo nutné zopakovat některá měření. Byly znovu vyrobeny zkušební návarové desky  $14\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}\text{ _A}$  a  $8\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}\text{ _A}$  a došlo i k úpravě samotných experimentů, kdy nejpodstatnější je náhrada termočlánků K novými termočlánky typu S, které jsou popsány v následující kapitole.

### 3.4. Zapojení a aplikace termočlánků typu S

Vzhledem k problémům při experimentech s termočlánky typu K, které jsou popsány v předchozích kapitolách, bylo rozhodnuto použít jiné termočlánky, které snesou vyšší teploty. Byly vybrány termočlánky typu S ( PtRh10% - Pt ) s průměrem vodičů 0,35 mm. Tento typ termočlánků snese teplotu až 1600 °C, což je dostačující i pokud by se dostal přímo na okraj svarové lázně. Vzhledem ke značně vysoké ceně termočlánků (cca 7 800Kč za 1 metr délky termočlánekového vedení), bylo nutné pořídit i kompenzační vedení (Obr. 36.)



*Obr. 36 Kompenzační a termočlánekové vedení typu*

#### Komponenty pro přípravu termočlánku na měření

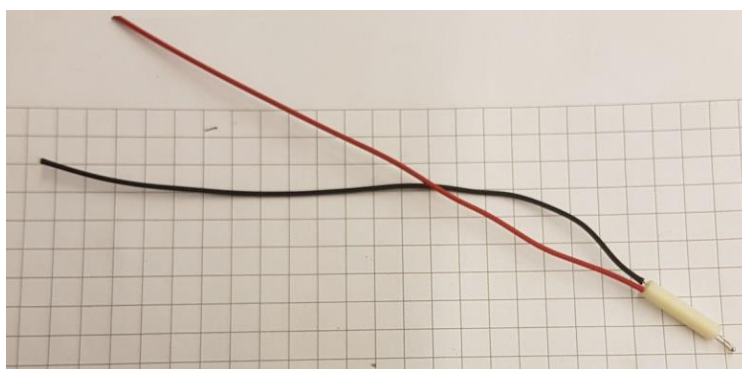
K sestavení vlastního termočlánku připraveného k měření bylo použito následujících komponentů:

- Termočlánekové vedení
- Kompenzační vedení
- Izolovací keramická trubička
- Izolace vodičů termočlánku
- Kabelové lisovací zakončovací dutinky

### Příprava vlastního termočlásku na měření

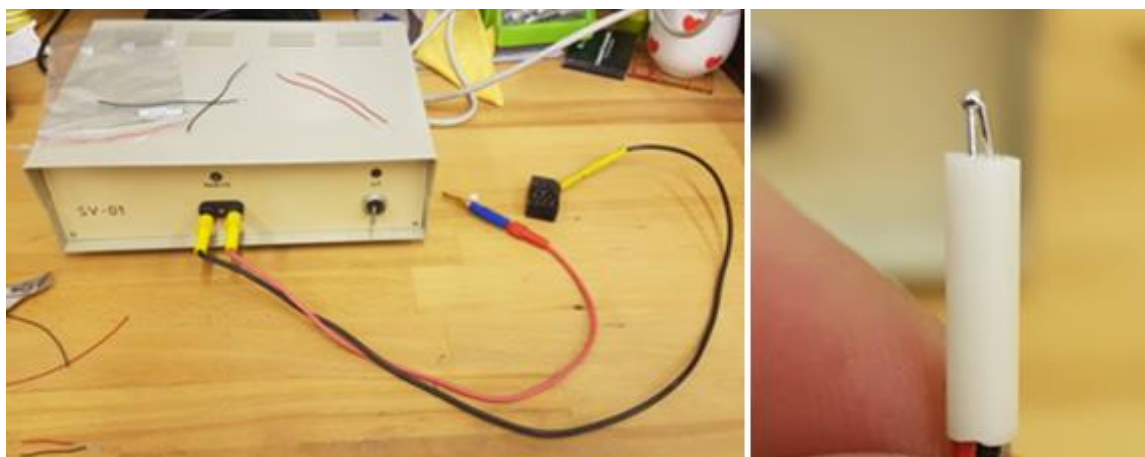
Z kompenzačního vedení bylo nastříháno 5 kusů dlouhých 1500 mm, stejně tak z termočláskového vedení bylo nastříháno 5 kusů z kladného vodiče a 5 kusů ze záporného vodiče. Délka termočláskových drátů byla zvolena 110 mm.

Na oba konce termočláskových drátů byla navlečena speciální izolace (kladný vodič - červená, záporný vodič - černá) a poté byla na oba vodiče navlečena keramická trubička, která má v sobě 4 otvory a funguje jako izolace proti vysokým teplotám v místě svařování a zároveň brání vzájemnému dotyku neizolovaných termočláskových drátů i dotyku se svařovaným materiálem. Takto připravené termočláskové vedení zobrazuje Obr. 37.



**Obr. 37 Připravené termočláskové vedení typu S**

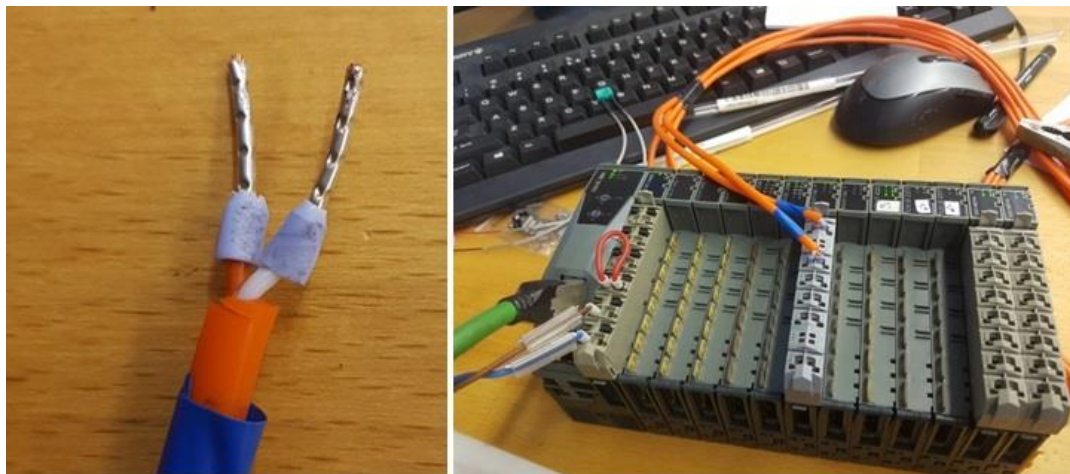
Pro koncové spojení vodičů byl zvolen jiný postup, než u termočlásku typu K. Vodiče byly přichyceny k sobě pomocí kondenzátorového výboje na podložce z uhlíkové elektrody. Tímto způsobem je na konci obou drátů vytvořena „kulička“, jak je zřejmé z Obr. 38. V žádném případě nesmí být přidán žádný přídavný materiál, kulička je pouze kondenzátorově natavený kov vodičů termočlásku.



**Obr. 38 Svářecí přístroj SV – 01 a vytvořená „kulička“ na konci vodičů termočlásku**

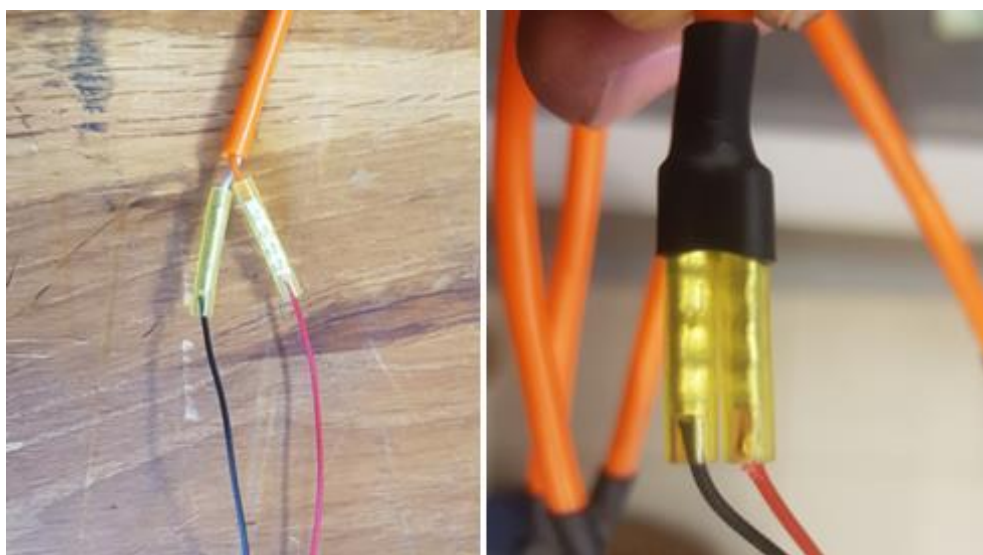


Následně bylo nutné připravit kompenzační vedení a to tak, že byly oba konce odizolovány, kdy na konec, který přijde do sběrnice byly krimpovacími kleštěmi zalisovány zakončovací dutinky (Obr. 39).



***Obr. 39 Konec kompenzačního vedení se zakončovací dutinkou a následné připojení do sběrnice***

Druhý konec je nutné spojit s termočláňkovým vedením tak, aby byla v místě spoje homogení teplota a zároveň, aby byl spoj dostatečně pevný a vodivý. Po několika pokusech se ukázalo jako nejlepší použití průchozí kabelové lisovací dutinky, kdy byl konec vodiče termočláňku vložen mezi svazek vodičů kompenzačního vedení a opět za pomoci krimpovacích kleští zalisován. Takto vzniklý spoj byl ještě překryt elektrikářskou smršťovací bužírkou, která po nahřátí dokonale přikryje spojované místo. Takto vytvořený spoj je vidět na Obr. 40.

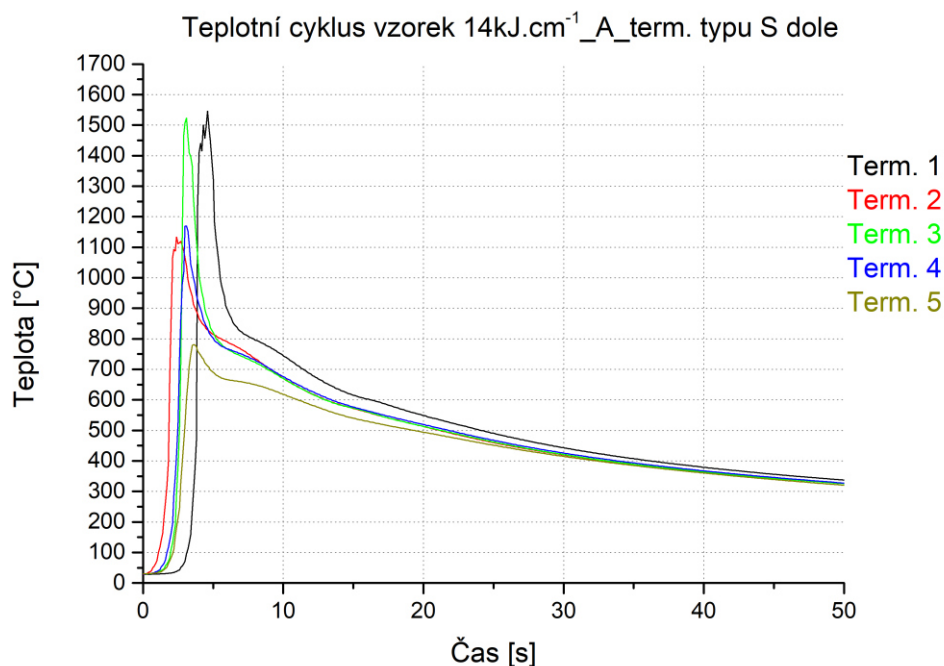


***Obr. 40 Vytvořený spoj kompenzačního a termočláňkového vedení***

Při spojování kompenzačního a termočlánekového vedení je nutné dodržet polaritu, což v tomto případě znamenalo, že je nutné vodič kompenzačního vedení s oranžovou izolací spojit s (+) drátem termočlátku S izolovaného červenou izolací. Vodič kompenzačního vedení s bílou izolací pak spojit s (-) drátem termočlátku S izolovaným černou izolací. Následně byly takto připravené termočláanky kondenzátorově přivařeny do otvorů obdobně, jako tomu bylo u termočláneků typu K a druhý konec (kompenzační vedení) byl zapojen do sběrnice. S takto zapojenými termočláanky pak byly realizovány vlastní experimenty.

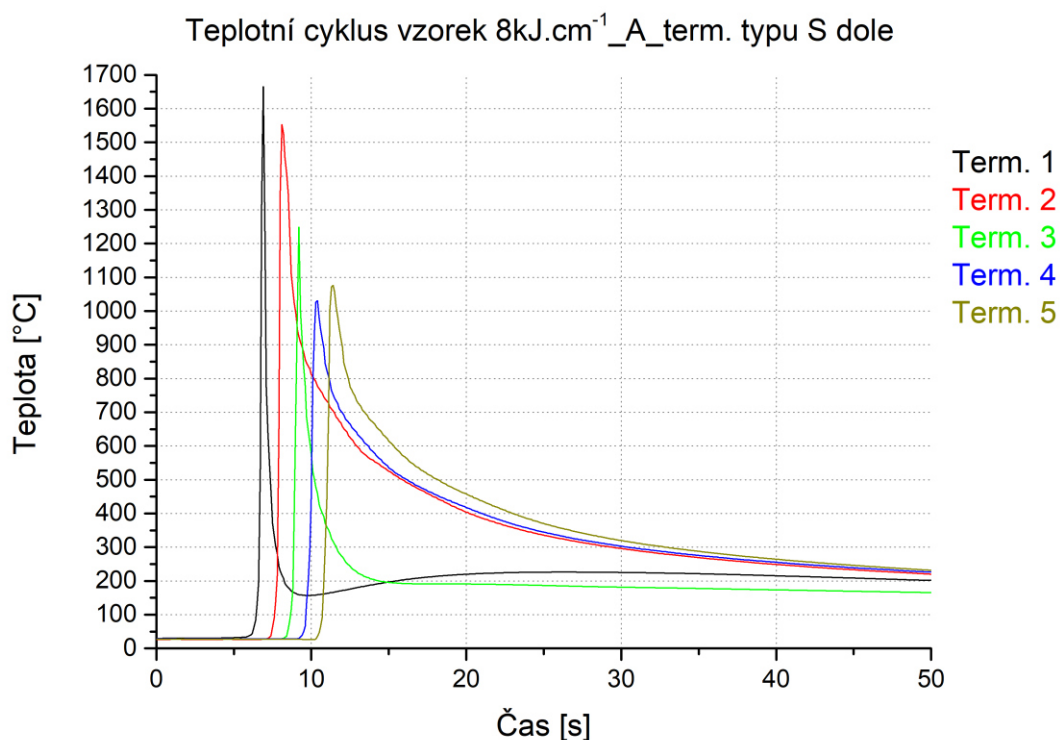
### 3.4.1. Teplotní cykly naměřené pomocí termočláneků typu S

S termočláanky typu S byla zopakována měření na vzorcích  $14 \text{ kJ.cm}^{-1}\text{A}$  a  $8 \text{ kJ.cm}^{-1}\text{A}$ . Z grafu (Obr. 41) je jasné patrné, že u návaru s hodnotou vneseného tepla  $14 \text{ kJ.cm}^{-1}$  došlo k výraznému zlepšení, co se týče získaných výsledků, kdy termočláanky typu S již dokázaly přesně zachytit skutečný teplotní cyklus probíhající v TOO návaru. Maximální naměřené teploty se pohybují v jednotlivých vzorcích mezi  $1500 - 1650 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Z takto naměřených cyklů již lze vycházet ve třetí fázi experimentální části práce při analýze vlivu zhrubnutí zrna v závislosti na hodnotě vneseného tepla. Lze tedy konstatovat, že použití termočláneků typu S, spojení s kompenzačním vedením a způsob přivaření se osvědčil při měření vysokých teplot ve vznikajících teplotních cyklech.



Obr. 41 Teplotní cyklus vzorek  $14 \text{ kJ.cm}^{-1}\text{A}$  termočláanky typu S v otvorech

Výše uvedené potvrzuje i graf (Obr. 42) pro návar na desce s hodnotou vneseného tepla  $8 \text{ kJ.cm}^{-1}$ . I zde došlo k naměření reálných teplotních cyklů s vysokými teplotami, které panují okolo hranice ztavení. Termočlánek 1 s nejvyšší naměřenou teplotou  $1665,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  se nacházel přímo ve svarové lázni a došlo k jeho upálení, stejně tak jako u termočlátku 3, což je opět vidět na strmosti ochlazovací části teplotního cyklu, kdy termočláanky chladnou na vzduchu po oddělení od materiálu.



Obr. 42 Teplotní cyklus vzorek  $8 \text{ kJ.cm}^{-1}$ \_A termočláanky typu S v otvorech

### 3.5. Definování rozložení teplot v TOO pro rozdílné hodnoty Q

Ne všechny experimenty, realizované při měření teplotních cyklů, mohly být využity pro definování rozložení teplot v TOO. U prvních měření teplotních cyklů s termočláanky typu K lze použít pouze vzorky, u kterých se vyfrézované otvory pro termočláanky nacházely dále od hranice ztavení, jedná se vzorky  $14 \text{ kJ.cm}^{-1}$ \_B a  $8 \text{ kJ.cm}^{-1}$ \_B. U vyšších teplot pak teplotní cykly velmi dobře zachytily termočláanky typu S, kdy při těchto měřeních byla získána chybějící data pro vzorky  $14 \text{ kJ.cm}^{-1}$ \_A a  $8 \text{ kJ.cm}^{-1}$ \_A. Dohromady složená data z obou typů termočláanek pak lze použít k popisu rozložení teplot v TOO.



K nejdůležitějším získaným parametrům patří kromě teplotního průběhu také vzdálenost termočlásku od hranice ztavení. Vzhledem k tomu, že hloubka provaření není konstantní a mění se v řádu desetin milimetru, jak bylo zjištěno při zkušebních měřeních (Obr. 21), byl v místě každého termočlásku proveden metalografický výbrus, takže získané vzdálenosti od hranice ztavení jsou velmi přesné.

Nastavené a skutečné procesní parametry, použité k vytvoření návarů na deskách s různou hodnotou měrného vneseného tepla, jsou uvedeny v Tab. 11.

**Tab. 11 Parametry svarů použitých pro měření teplotních cyklů Q14 a Q8**

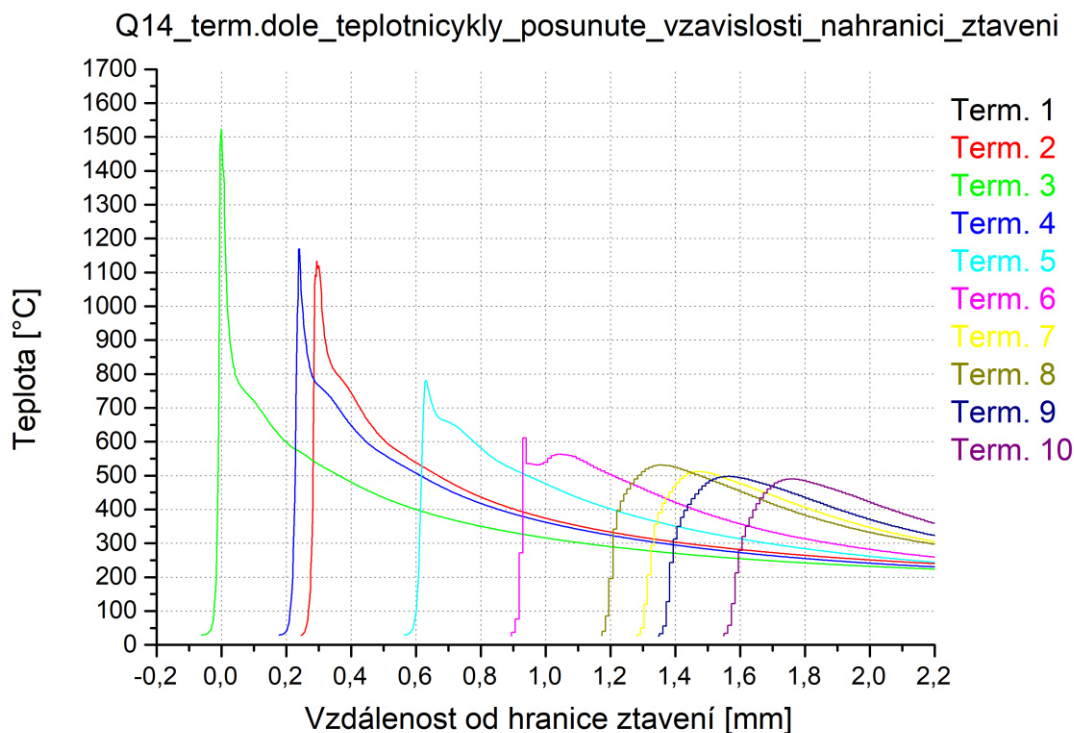
Měr. vnes. teplo [kJ.cm <sup>-1</sup> ]	Svar	Typ term.	Nastavené parametry		Skutečné parametry		
			Proud [A]	Rychlost svařování [cm.min <sup>-1</sup> ]	Měr. vnes. teplo [kJ.cm <sup>-1</sup> ]	Napětí [V]	Proud [A]
<b>14</b>	14 kJ.cm <sup>-1</sup> _A	S	300	38	13,86	304,8	28,8
	14 kJ.cm <sup>-1</sup> _B	K			13,87	307,2	28,6
<b>8</b>	8 kJ.cm <sup>-1</sup> _A	S	300	66	8,01	310,2	28,4
	8 kJ.cm <sup>-1</sup> _B	K			7,95	308,0	28,4

Metalograficky změřené vzdálenosti termočlásků od hranice ztavení a maximální teploty změřených cyklů u návaru s měrným vneseným teplem 14 kJ.cm<sup>-1</sup> jsou uvedeny v Tab. 12.

**Tab. 12 Vybrané parametry při měření teplotního cyklu Q14**

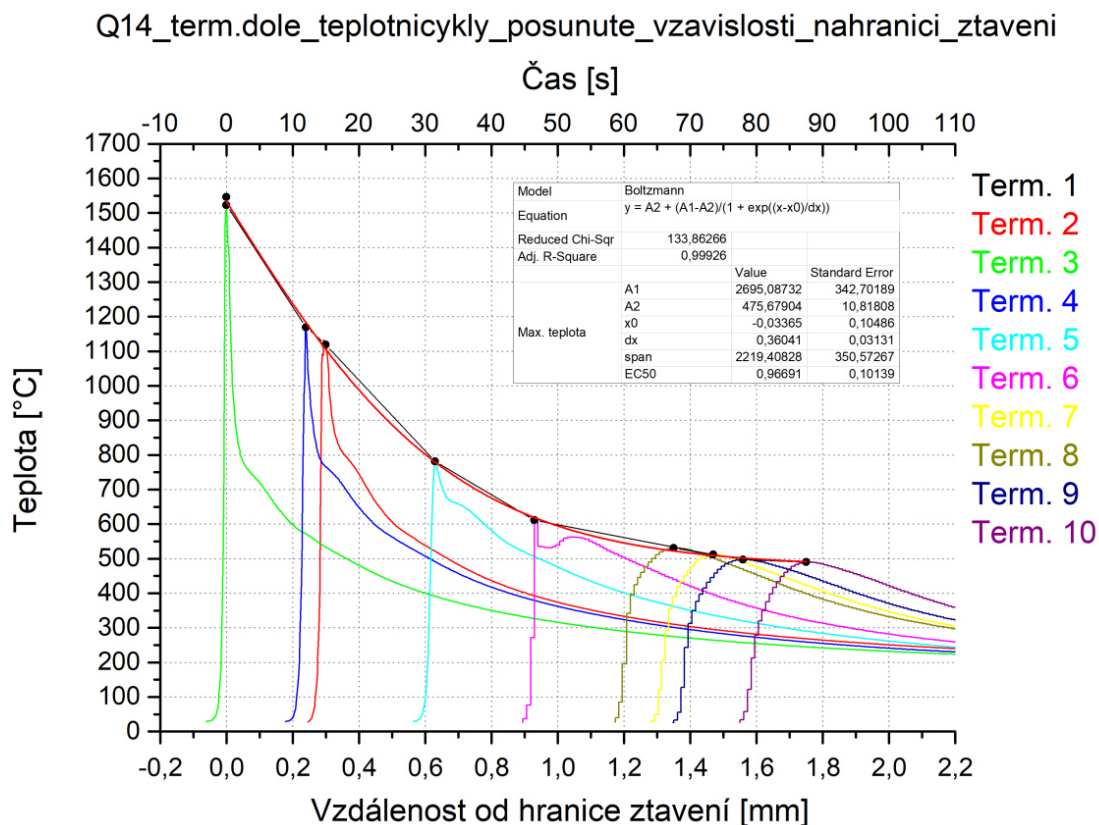
Termočlánek	Typ termočlásku	Maximální teplota [°C]	Vzdálenost od hranice ztavení [mm]
Term.1	S	1545,9	0
Term.2	S	1119,1	0,3
Term.3	S	1522,6	0
Term.4	S	1169,6	0,24
Term.5	S	781,1	0,63
Term.6	K	611,4	0,93
Term.7	K	511,5	1,47
Term.8	K	531	1,35
Term.9	K	497,4	1,56
Term.10	K	489,9	1,75

Jak je vidět, podařilo se poměrně dobře zmapovat rozložení teplot v tepelně ovlivněné oblasti a popsat tak teplotní cykly od samé hranice ztavení až po vzdálenost 1,75 mm. Pro lepší ilustraci byl vytvořen graf (Obr. 43), kdy jsou teplotní cykly seřazeny v závislosti na vzdálenosti od hranice ztavení.



**Obr. 43** Teplotní cykly *Q14* seřazené v závislosti na vzdálenosti od hranice ztavení

Body s maximální teplotou v jednotlivých naměřených cyklech byla proložena křivka, která byla aproximována metodou Boltzmann. Tím byl získán matematický popis této křivky (Obr. 44) a tedy i popis křivky rozložení teplot v TOO návaru s měrným vneseným teplem  $14 \text{ kJ.cm}^{-1}$ .



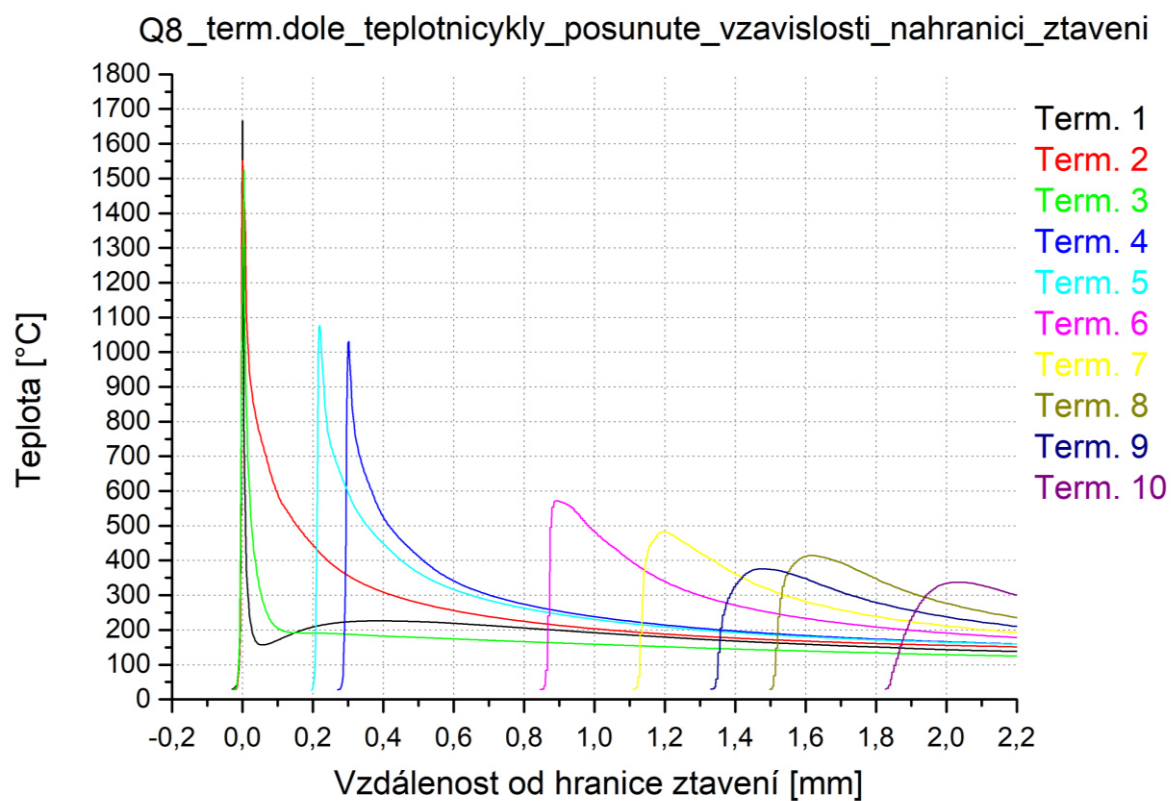
**Obr. 44** Matematický popis teplotního cyklu Q14

Obdobně se podařilo popsat i cyklus s měrným vneseným teplem  $8 \text{ kJ.cm}^{-1}$ , kde byl opět zachycen reálný teplotní cyklus s maximální teplotou  $1665,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a popsána byla oblast od samé hranice ztavení až po vzdálenost  $2,03 \text{ mm}$ . Získané hodnoty z měření s měrným vneseným teplem  $8 \text{ kJ.cm}^{-1}$  zobrazuje Tab. 13.

**Tab. 13** Vybrané parametry při měření teplotního cyklu Q8

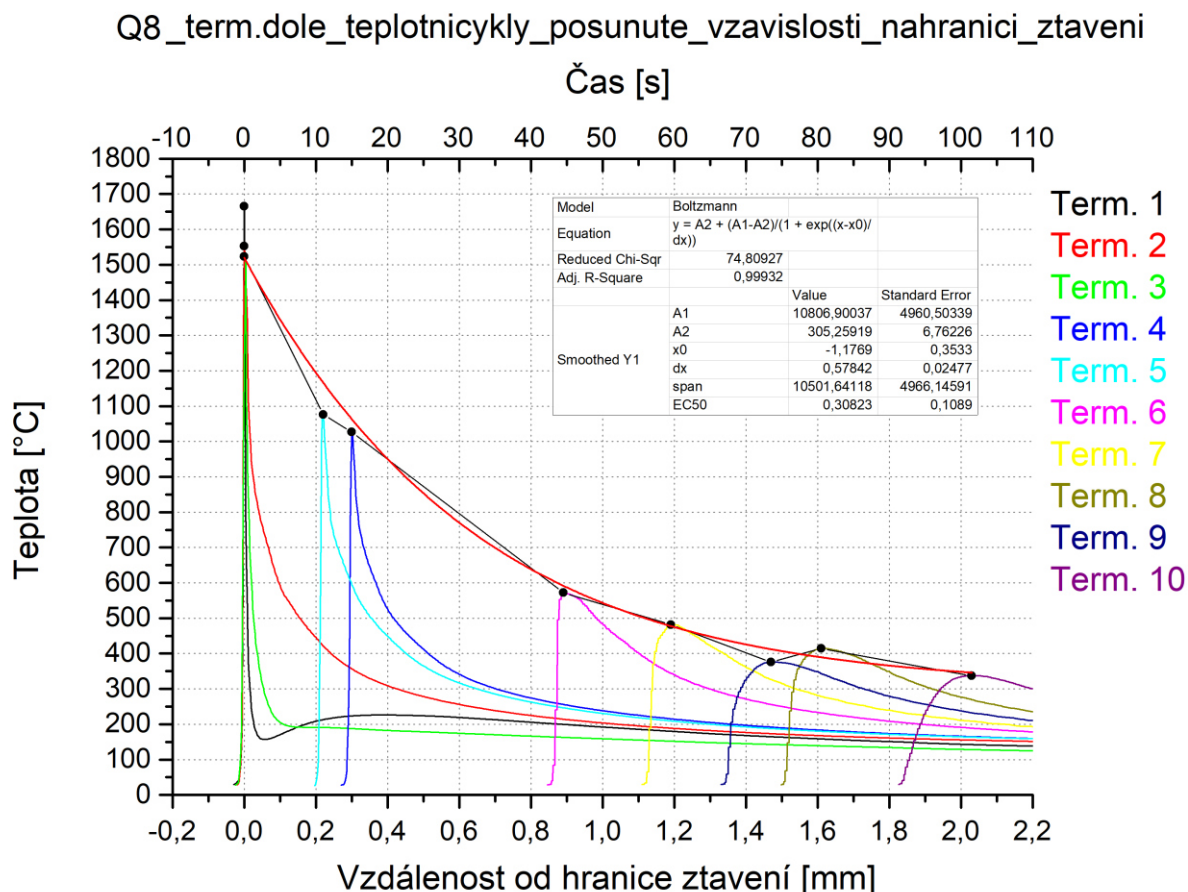
Termočlánek	Typ termočláčku	Maximální teplota [°C]	Vzdálenost od hranice ztavení [mm]
Term.1	S	1665,5	0
Term.2	S	1552,3	0
Term.3	S	1523,5	0
Term.4	S	1026,6	0,3
Term.5	S	1076,2	0,22
Term.6	K	572,2	0,89
Term.7	K	481,9	1,19
Term.8	K	414,6	1,61
Term.9	K	375,5	1,47
Term.10	K	337,2	2,03

Teplotní cykly Q8 seřazené v závislosti na vzdálenosti od hranice ztavení zobrazuje graf (Obr. 45).



**Obr. 45** Teplotní cykly Q8 seřazené v závislosti na vzdálenosti od hranice ztavení

Body s maximální teplotou v jednotlivých naměřených cyklech byla opět proložena křivka, která byla aproximována metodou Boltzmann. Tím byl získán matematický popis této křivky (Obr. 44) a tedy i popis křivky rozložení teplot v TOO návaru s měrným vneseným teplem  $8 \text{ kJ.cm}^{-1}$ .



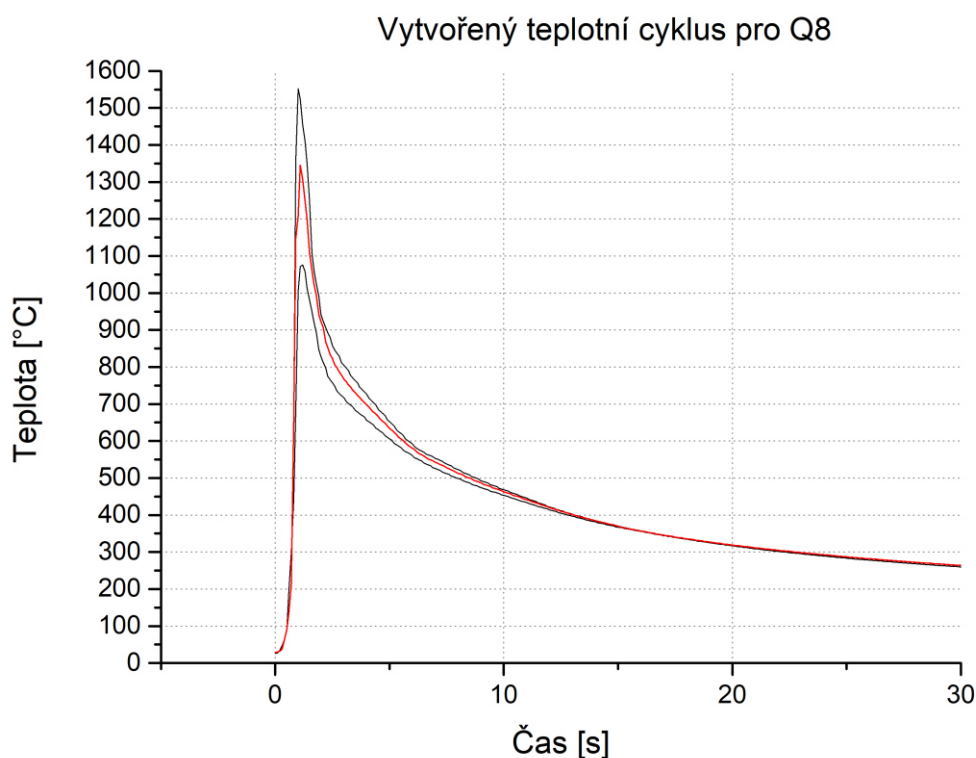
Obr. 46 Matematický popis teplotního cyklu Q8

### 3.6. Aplikace naměřených teplotních cyklů na jemnozrnnou ocel S460MC

Posledním úkolem bylo posouzení vlivu teplotních cyklů získaných při různých hodnotách měrného vneseného tepla při aplikaci na jemnozrnnou ocel S460MC. Cílem bylo zjistit, jaký vliv má měrné vnesené teplo na výslednou strukturu svařovaného materiálu. Konkrétně byl zjišťován rozdíl ve zhrubnutí zrna ve vysokoohřáté oblasti TOO.

Teplotní cykly byly vybrány tak, aby byly mezi sebou porovnatelné, tedy ze stejného místa TOO. K tomu byly použity matematické popisy křivek rozložení teplot v TOO získané z předchozích měření. Konkrétně byla na matematickém modelu cyklu Q8 vybrána vzdálenost od hranice ztavení 0,1 mm a ze dvou cyklů, které byly této hodnotě nejbližší, byl za pomoci váženého průměru vytvořen cyklus výsledný, s maximální teplotou odpovídající matematickému popisu (Obr. 47). Černá křivka zobrazuje naměřené cykly

nejblíže vzdálenosti od hranice ztavení 0,1 mm a červená křivka zobrazuje vytvořený cyklus.

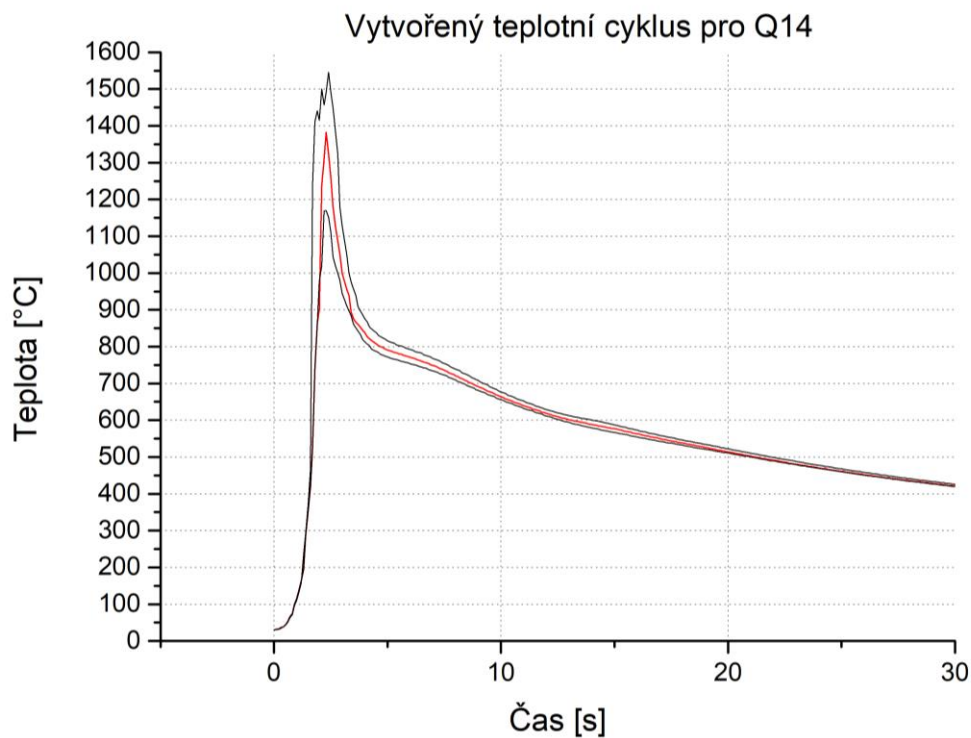


**Obr. 47 Naměřené cykly a vytvořený cyklus Q8 pro hodnotu měrného vneseného tepla  $8 \text{ kJ.cm}^{-1}$**

Obdobně byl vytvořen i teplotní cyklus pro hodnotu měrného vneseného tepla  $14 \text{ kJ.cm}^{-1}$ , který je vyobrazen na Obr. 48. Díky tomu, že oba cykly s rozdílnými hodnotami vneseného tepla  $8$  a  $14 \text{ kJ.cm}^{-1}$  byly vytvořeny ve stejné vzdálenosti od hranice ztavení, bylo docíleno toho, že jsou mezi sebou dobře porovnatelné. Ze získaných průběhů je zřejmý vliv měrného vneseného tepla na tvar těchto teplotních cyklů.

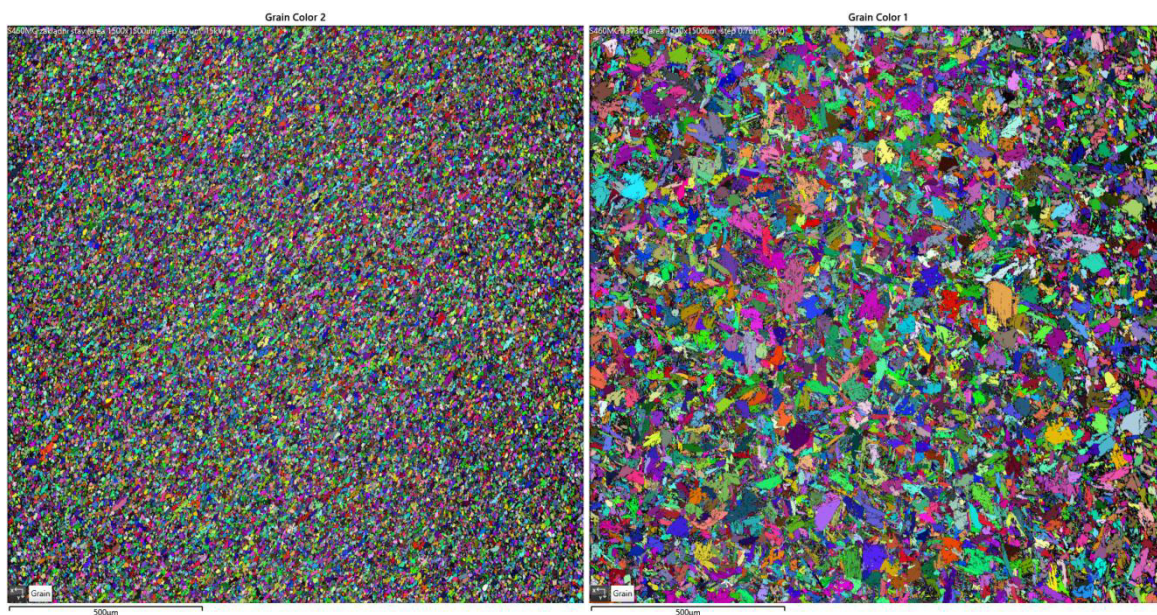
Získané teplotní cykly byly následně aplikovány na vzorečky z oceli S460MC v quenching dilatometru DIL 805L. Vzorky byly ve formě válečku o průměru 4 mm a délce 10 mm. K dosažení správné ochlazovací rychlosti bylo použito hélium.





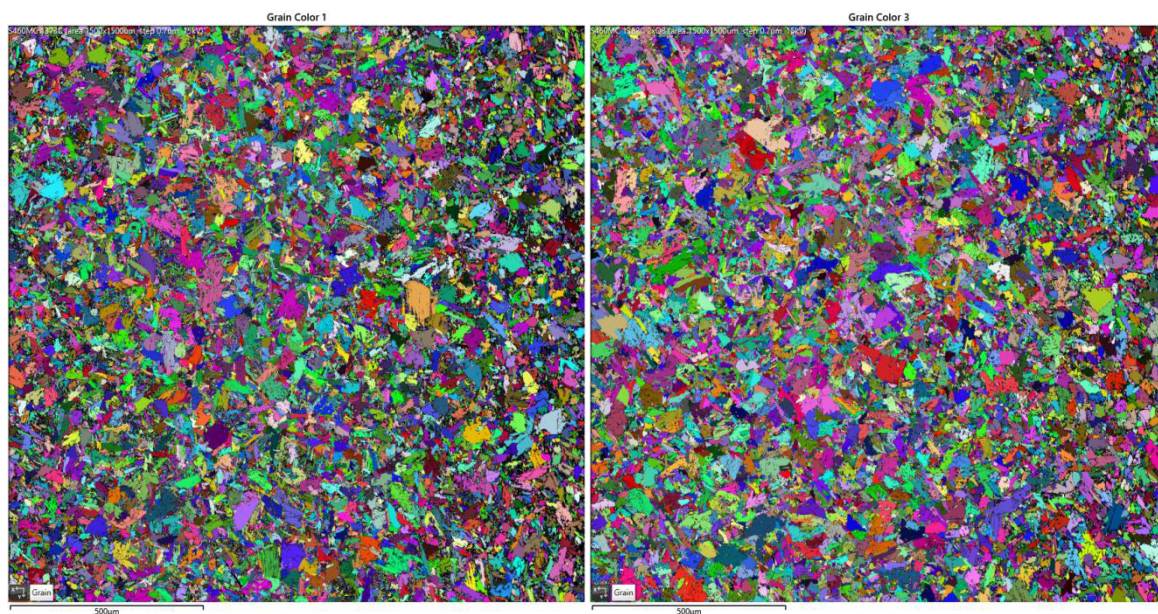
**Obr. 48** Naměřené cykly a vytvořený cyklus Q14 pro hodnotu měrného vnes. tepla  $14 \text{ kJ.cm}^{-1}$

Po proběhnutí dilatometrického cyklu byl následně na vzorečkách udělán metalografický výbrus a za pomoci EBDS analýzy byla zjišťována velikost zrn. Stejně tak i pro neovlivněný základní materiál. Jak je zřejmé z Obr. 49, aplikací teplotního cyklu došlo k výraznému zhrubnutí zrna.



**Obr. 49** Výsledná velikost zrn – zleva: základní materiál bez proběhnutého teplotního cyklu a materiál pro proběhnutí teplotního cyklu Q8

Stejným způsobem byla stanovena velikost zrna u vzorečku po aplikaci teplotního cyklu Q14. Na Obr. 50 je ukázán výsledek zhrubnutí zrna po teplotním cyklu Q8 a teplotním cyklu Q14. Vizuálně není vidět žádný rozdíl. Výsledky EBSD analýzy jsou přehledně ukázány v Tab. 14, včetně procentuálního porovnání. Plocha pro rozlišení velikosti zrna je normou udávána na 100\*100 pixelů, což znamená, že pokud je jedno zrno menší než tato hodnota, tak ho již přístroj nedokáže odlišit. Proto byla ještě provedena analýza plochy s rozlišením 10\*10 pixelů.



**Obr. 50** Rozdíl ve velikosti zrn – zleva: materiál po proběhnutí teplotního cyklu Q8 a materiál pro proběhnutí teplotního cyklu Q14

**Tab. 14** Výsledky zhrubnutí zrna získané pomocí EBSD analýzy

Teplotný cyklus	Max. teplota [°C]	Velikost zrna dle normy 100*100 px [µm]	Velikost zrna 10*10 px [µm]	Zhrubnutí oproti základnímu stavu [%]	
				100*100px	10*10px
Základní stav	-	9,97	5,43	0	0
Q8	1372,9	14,90	6,74	49,45	24,13
Q14	1383,1	15,20	7,25	52,46	33,52

Dle normované plochy došlo ke zhrubnutí zrna po proběhnutí cyklu Q8 o 49,45 % a po proběhnutí cyklu Q14 o 52,46 %. Z těchto dat je zřejmé, že teplotní cykly patřící do vysokoohřáté oblasti TOO mají výrazný vliv na zhrubnutí zrna. Z pohledu hodnoty měrného vneseného tepla pak byl rozdíl ve velikosti zrna velmi malý.



## 4. Diskuze výsledků

Cílem první fáze experimentální části bylo posoudit vliv vneseného tepla a intenzity odvodu tepla na geometrii návaru. Získané výsledky byly využity ve druhé fázi při měření teplotních cyklů a definování jejich přesné vzdálenosti od hranice ztavení, což umožnilo matematické vyjádření rozložení teplot v TOO. Třetí fáze sloužila k posouzení vlivu teplotních cyklů získaných pro různé hodnoty měrného vneseného tepla na změnu velikosti zrna v TOO.

Vliv hodnoty vneseného tepla na geometrii svarové lázně byl proveden pomocí změny procesních parametrů, konkrétně rychlosti svařování. Velikost proudu a napětí byly z důvodu porovnání zachovány. Celkem bylo provedenou 7 svarů s rozdílnými hodnotami měrného vneseného tepla, konkrétně  $Q = 8; 9; 12; 13$  a  $14 \text{ kJ.cm}^{-1}$ . Proud byl ve všech případech nastaven na 300 A, napětí 28,6 V a rychlosti svařování se měnily v rozmezí  $38 - 66 \text{ cm.min}^{-1}$ . S rostoucím měrným vneseným teplem rostla jak šířka, tak hloubka průvaru a tím pádem samozřejmě i plocha celého svaru. Tento fakt je způsoben tím, že je do místa svařování dodána vyšší energie, materiál má delší čas na protavení se do větší hloubky a do místa svařování je dodáno větší množství přídavného materiálu. Pro posouzení stability geometrie návaru byly provedeny výbrusy na začátku, uprostřed a na konci svaru. Z výsledků (Tab. 7) je zřejmé, že proces je stabilní a odchylky od střední hodnoty plochy průřezu návaru a průvaru nepřesáhly 4,5%.

Při měření vlivu intenzity odvodu tepla na geometrii návaru byl rozdíl v odvodu tepla simulován použitím různých tloušťek materiálu. Byly použity tloušťky 8, 12 a 15 mm a vliv intenzity odvodu tepla byl hodnocen při hodnotách měrného vneseného tepla 8, 10, 12 a  $14 \text{ kJ.cm}^{-1}$ . Nejpodstatnější bylo zjištění, že při různé intenzitě odvodu tepla nedochází k rozdílným změnám v průřezu svarové plochy. Všechny 3 křivky, získané pro různé tloušťky materiálu, mají podobný trend pouze s malými odchylkami, způsobenými vlastním svařováním. Hodnoty průvaru se však měnily v řádu desetin milimetru. Největší rozdíly byly zjištěny pro  $Q14 \text{ kJ.cm}^{-1}$ , tam se intenzita odvodu tepla projevila až 10% rozdílem v hloubce průvaru.

Výsledky z první fáze experimentálních měření byly aplikovány ve druhé fázi měření, kdy byl zjišťován vliv hodnoty měrného vneseného tepla na tvar teplotních cyklů, vznikajících v materiálu při svařování metodou MAG. Pro tato měření musely být navrženy vzorky s odstupňovanými vyfrézovanými otvory ve vzdálenosti o 0,0 – 1,8 mm od předpokládané hranice ztavení s krokem 0,2 mm. V těchto otvorech byly následně umístěny termočlánky.

Teplotní cykly byly nejprve měřeny termočládky typu K, u kterých však byly problémy s měřením při teplotách nad 1200 °C. Nakonec byly za pomoci termočládku typu K změřeny pouze teplotní cykly s nižší maximální teplotou (vzorky s otvory dále od hranice ztavení). Proto bylo rozhodnuto využít, pro měření teplot blízko hranice ztavení, termočládky typu S. S jejich využitím však nebyly žádné zkušenosti a musela být vytvořena metodika měření teplot s využitím kompenzačního vedení.

Získané teplotní cykly pak byly použity pro získání matematického popisu rozložení teplot v TOO při hodnotách měrného vneseného tepla 8 a 14 kJ.cm<sup>-1</sup>. Matematický popis křivek maximálních teplot od hranice ztavení je pro hodnotu vneseného tepla 8 a 14 kJ.cm<sup>-1</sup> zobrazen na obrázcích Obr. 51 a Obr. 52.

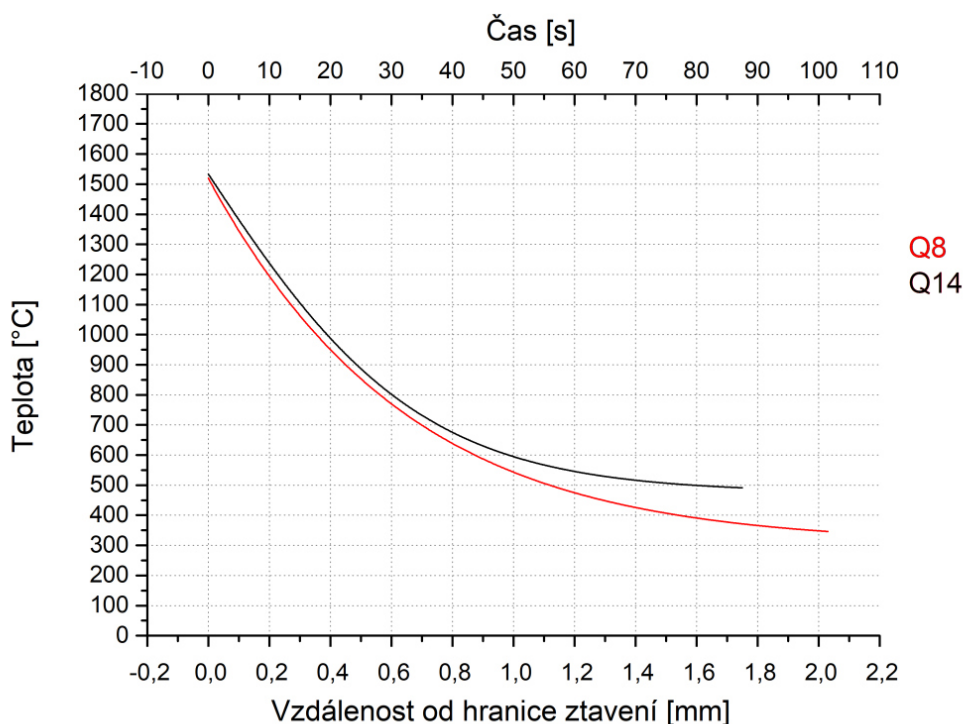
Model	Boltzmann		
Equation	$y = A2 + (A1-A2)/(1 + \exp((x-x0)/dx))$		
Reduced Chi-Sqr	74,80927		
Adj. R-Square	0,99932		
		Value	Standard Error
Smoothed Y1	A1	10806,90037	4960,50339
	A2	305,25919	6,76226
	x0	-1,1769	0,3533
	dx	0,57842	0,02477
	span	10501,64118	4966,14591
	EC50	0,30823	0,1089

**Obr. 51 Matematický popis křivky teplotního rozložení v TOO pro měrné vnesené teplo 8 kJ.cm<sup>-1</sup>**

Model	Boltzmann		
Equation	$y = A2 + (A1-A2)/(1 + \exp((x-x0)/dx))$		
Reduced Chi-Sqr	133,86266		
Adj. R-Square	0,99926		
		Value	Standard Error
Max. teplota	A1	2695,08732	342,70189
	A2	475,67904	10,81808
	x0	-0,03365	0,10486
	dx	0,36041	0,03131
	span	2219,40828	350,57267
	EC50	0,96691	0,10139

**Obr. 52 Matematický popis křivky teplotního rozložení v TOO pro měrné vnesené teplo 14 kJ.cm<sup>-1</sup>**

Porovnání těchto dvou křivek se nachází na obrázku (Obr. 53).



**Obr. 53 Porovnání rozložení maximálních teplot v TOO v závislosti na vzdálenosti od hranice ztavení**

Jak je patrné z obrázku, tak při nižším měrném vneseném teple, dochází k vnesení nižší energie do materiálu a s rostoucí vzdáleností od hranice ztavení se rozdíl mezi křivkami zvětšuje, kdy ve vzdálenosti 1,4 mm je tento rozdíl okolo 100 °C. Tento rozdíl se projeví i na strukturních změnách v TOO. Ve vysokoohřáté oblasti TOO pak rozdíly v teplotách nejsou až tak značné.

Třetí fáze experimentů byla zaměřena na posouzení vlivu teplotních cyklů na změny velikosti zrna v TOO. K tomu byly použity teplotní cykly vytvořené s použitím matematického popisu křivek rozložení teplot v TOO a tvarem odpovídajícím hodnotě vneseného tepla viz. Obr. 47 a Obr. 48. Tyto cykly byly následně aplikovány na vzorky z jemnozrnné oceli S460MC. Na vzorcích byla následně udělána EBDS analýza vedoucí ke stanovení velikosti zrna. U teplotního cyklu Q8 došlo ke zhrubnutí zrna o 49,5 % a u teplotního cyklu Q14 o zhrubnutí zrna o 52,5 % oproti základnímu materiálu. Z těchto dat je zřejmé, že teplotní cykly patřící do vysokoohřáté oblasti TOO mají výrazný vliv na zhrubnutí zrna. Z pohledu hodnoty měrného vneseného tepla pak byl rozdíl ve velikosti zrna velmi malý.

## 5. Závěr

Diplomová práce je zaměřena na stanovení vlivu hodnoty vneseného tepla na geometrii svaru a tvar teplotních cyklů při svařování metodou MAG. V teoretické části se práce zabývá fyzikálními veličinami potřebnými pro popis vzniku a šíření teplotních polí při svařování, popisuje princip svařování obloukovými metodami (se zaměřením na metodu MAG) a je věnována změnám, k nimž dochází v TOO, teplotním cyklům a způsobům jejich měření. Experimentální část práce byla řešena ve třech fázích zaměřených na stanovení vlivu vneseného tepla a intenzity odvodu tepla na geometrii návaru. Dále pak na nalezení ustálené oblasti svařování vhodné pro umístění termočlánků, měření teplotních cyklů a popis rozložení teplot v TOO a konečně na posouzení vlivu získaných teplotních cyklů s rozdílnou hodnotou vneseného tepla na zhrubnutí zrna u oceli S460MC.

Na základě provedených experimentů a získaných výsledků lze učinit následující závěry:

- Vnesené teplo má významný vliv na geometrii návaru – s rostoucím vneseným teplem roste šířka, průvar a plocha návaru. Pro měrná vnesená tepla v rozmezí 8 – 14 kJ.cm<sup>-1</sup> bylo dosaženo vysoké geometrické stability s odchylkami od střední hodnoty nižšími než 5%.
- Intenzita odvodu tepla nemá podstatný vliv na plochu průřezu svarové plochy, hodnoty průvaru se však mění výrazněji. Rozdíly dosahovaly až 10%.
- Pro správné mapování rozložení teplot v TOO je nezbytné využít termočlánky typu S, případně lze pro měření teplot nižších než 1200 °C použít termočlánky typu K.
- K popisu rozložení teplot v TOO svarů provedených metodou MAG lze pro hodnoty vneseného tepla 8 a 14 kJ.cm<sup>-1</sup> použít rovnice na obrázcích 51 a 52.
- K popisu rozložení teplot v TOO svarů provedených metodou MAG lze pro hodnoty vneseného tepla v intervalu 8 - 14 kJ.cm<sup>-1</sup> použít aproximaci rovnic z obrázků 51 a 52.
- Teplotní cykly patřící do vysokoohřáté oblasti TOO mají výrazný vliv na zhrubnutí zrna, minimálně u oceli S460MC.
- Vyšší hodnota měrného vneseného tepla však nezpůsobila výraznější zhrubnutí zrna. Rozdíl ve zhrubnutí zrna u teplotních cyklů odpovídajících 8 a 14 kJ.cm<sup>-1</sup> byl okolo 3%.

## Literatura

- [1] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie svařování, Studijní opory pro výuku v kurzech 5TE, ETV, ETV-K*. ÚST, odbor svařování a PÚ, 2010. Výukový text. VUT v Brně.
- [2] SVARECKY-ELEKTRODY. *Svařování MIG/MAG - seznámení*. [online] [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-mig-mag-zakladni-seznameni/t-41/t-116>
- [3] MORAVEC, Jaromír. *Studijní opory pro výuku předmětů Technologie I-III*. Technická univerzita v Liberci, Katedra strojírenské technologie. Výukový text. TU v Liberci
- [4] VONDRÁČEK, JIŘÍ. *Vliv rychlosti ohřevu a ochlazování na transformační změny materiálu*. Technická univerzita v Liberci, Katedra strojírenské technologie, 2018. Bakalářská práce. TU v Liberci.
- [5] NĚMEC, KAREL. *Vliv vneseného tepla na vlastnosti a strukturu svarového spoje duplexní oceli*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. Diplomová práce. VUT v Brně
- [6] KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK, 2009. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Český svářečský ústav : VŠB - Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [7] MORAVEC, Jaromír. *Vliv procesních parametrů na geometrii svarové lázně při svařování v ochranných atmosférách*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2011. ISBN 978-80-7372-805-2.
- [8] KUTIL, Petr. *Porovnání produktivity technologie svařování MAG a FCAW*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. Bakalářská práce. VUT v Brně.
- [9] MORAVEC, Jaromír. *Analýza kritických míst svařovacího procesu na základě simulací v programu SYSWELD*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008. Disertační práce. TU v Liberci.
- [10] Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství *Termická analýza - teorie*. [online]. 166 28 Praha 6 – Dejvice: VŠCHT Praha [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Termick%C3%A1%20anal%C3%BDza.pdf?redirected>
- [11] KOLAŘÍK, Ladislav. *Termovizní kontrola svarových spojů* [online]. Ústav strojírenské technologie FS ČVUT v Praze, Workswell, 2017 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <http://www.digitovarna.cz/clanek-84/termovizni-kontrola-svarovych-spoju.html>
- [12] HARMANIAK, Daniel. *Štúdium vplyvu procesu zvarania na zmenu vlastností TOO zvarových spojov ocele S960MC*. Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta, 2020. Dizertačná práca. Žilina.

- [13] NGONGANG, AurelienNgongang a RUTRONIK. Snímače IR MEMS ThermopileArray. In: *DPS Elektronika od A do Z* [online]. Liberec 15: CADware, 2016 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/soucastky/id:26125/z-aktualniho-vydani-casopisu-snimace-nbsp-ir-nbsp-mems-thermopile-array>
- [14] KOUKAL, J., SCHWARZ, D. *Závěrečná technická zpráva je grantovému úkolu GAČR č.106/0556*, Ostrava: VŠB- Technická univerzita, 2003.
- [15] Měření teploty - 1 Doplněná inovovaná přednáška. In: *Kts.tul* [online]. Liberec: Katedra textilních a jednoúčelových strojů TUL, 2012 [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: [http://www.kts.tul.cz/content/files/podklady/In-TECH2\\_Mereni\\_teploty\\_1\\_ver2.pdf](http://www.kts.tul.cz/content/files/podklady/In-TECH2_Mereni_teploty_1_ver2.pdf)
- [16] PILOUS, Václav. *Materiály a jejich chování při svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Plzeň: ŠKODA WELDING, 2009.
- [17] BENEŠ, Libor. *Svařování*. Fakulta strojní ČVUT v Praze [online]. Praha: ČVUT FS, 2014-2019 [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka-/svarovani/UT\\_01\\_Prehled\\_svarovani\\_T08.pdf](http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka-/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf)
- [18] MORAVEC, Jaromír. *Měření mechanických vlastností materiálu S460MC při různých podmínkách ohřevu a ochlazování*. Liberec: TU v Liberci, 2017.
- [19] Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. ISBN 80-857-7185-3.
- [20] TECHPORTAL, nedatováno. *Interpass teplota* [online] [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: [https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR\\_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a\\_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCydihM4P1vIsZtYcKB4a7Ik-w](https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCydihM4P1vIsZtYcKB4a7Ik-w)